

Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України
Інженерний інститут

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Дмитрієв Вадим Сергійович

УДК 621.382.2/3

ДИСЕРТАЦІЯ

Омічні та інжектуючі бар'єрні переходи до арсеніду галію

Спеціальність: 05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво
електронної техніки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____ В.С. Дмитрієв

Науковий керівник Швець Євгеній Якович, кандидат технічних наук,
професор

Київ, 2019 р.

АНОТАЦІЯ

Дмитрієв В. С. Омічні та інжектуючі бар'єрні переходи до арсеніду галію. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.27.06 - Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Інженерний інститут Запорізького національного університету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці технології відтворюваного отримання омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію n-типу провідності.

Розвиток засобів мобільного зв'язку, високошвидкісних бездротових телекомунікаційних засобів та волоконно-оптичних систем потребує використання сучасних електронних приладів НВЧ діапазону, які виготовляються на основі електронного арсеніду галію. Одними з основних елементів НВЧ приладів є омічні та інжектуючі бар'єрні переходи, виготовлені, зокрема, на основі золота.

Проблема недостатності знань про закономірності та особливості формування срібломістких контактів метал-GaAs обумовлює необхідність подальших досліджень для удосконалення промислової технології виробництва GaAs приладів з металізацією на основі срібла.

Використання срібла, перевагами якого є більша тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію та менша собівартість для створення цих переходів, має покращити технічні характеристики НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі.

Проаналізовано вплив різних чинників на якість омічних та інжектуючих бар'єрних переходів до арсеніду галію.

Встановлено, що фізична модель реального контакту метал-напівпровідник (КМН) є складнішою в порівнянні з моделями ідеального КМН. Дістала подальшого розвитку модель, яка описує процеси переносу між електронами металу, граничними станами та вільними носіями напівпровідника. Модель дозволяє вивчити реальну структуру метал-напівпровідник з урахуванням впливу ефектів швидких та повільних станів та впливу проміжного окисного шару у цілому, і може враховувати будь-який фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

Проведений аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції у простих діодних структурах $R-p^+-n(p)-n^+-R$, які мають два активні інжектуючі бар'єрні переходи та омічні переходи до низькоомних областей, показав, що усі математичні викладки можуть бути використані для розрахунку більш складних структур.

Проведено теоретичні дослідження впливу інжекттованих неосновних носіїв заряду на параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на прикладі планарної конструкції діоду Шотткі. За їх результатами доведено необхідність урахування впливу неосновних носіїв в області просторового заряду в контакті з бар'єром Шотткі, яка призводить до появи залежності робочих характеристик діода від струму інжекції, накопичення заряду та спотворення поля в приконтактній області.

Проаналізовано існуючі технології виготовлення багатокомпонентних омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію.

Реальні епітаксійні плівки, які використовують в основному для виготовлення випрямляючого КМН, мають нерівномірний розподіл домішок, що виникає в процесі вирощування плівки. Електрофізичні параметри реальних поверхонь напівпровідників після обробки існуючими способами

стають неоднорідними уздовж поверхні, а отже потребують розробки більш ефективних методів пасивації поверхні GaAs.

Показано, що досі існуючі технології виготовлення омичних та інжектуючих бар'єрних переходів срібло-арсенід галію мають ряд недоліків, зокрема недостатню відтворюваність параметрів контактів. Також існують розбіжності в питаннях встановлення причин відхилення вольт-амперних характеристик від ідеальних, що пов'язано з технологічними особливостями їх виготовлення.

Визначено, що серед найбільш ефективних засобів управління структурою межі розділу метал-напівпровідник є відпал тонкоплівкових структур, механізм якого досі повністю не вивчений і не розкритий. Відомі дані про температурні режими створення бар'єрних переходів на GaAs дуже різняться. Тому дослідження впливу умов осадження металу та режимів термообробки на електрофізичні параметри срібломістких контактів метал-GaAs виділяються у самостійну наукову проблему, рішення якої може привести до суттєвого уточнення уявлень про процеси у контактах метал-GaAs та дозволить покращити технічні характеристики та параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на GaAs, зокрема, приладів з міждолинним електронним переходом (МЕП-приладів). Таким чином, дослідження закономірностей, розробка та оптимізація технологічних режимів відтворюваного отримання омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs з оптимальними показниками якості та технологічності для приладів НВЧ діапазону є важливою і актуальною задачею як з наукової так і з практичної точок зору.

Розглянуто та запропоновано методики вимірювання та розрахунку основних параметрів омичних та інжектуючих бар'єрних переходів, розроблено схему і методику вимірювання параметрів НВЧ приладів.

Проведено комплексні технологічні й електрофізичні дослідження одно- і багатокомпонентних металевих контактних систем на основі срібла до $n-n^+$ GaAs.

Результати експериментальних досліджень доповнюють уявлення про закономірності формування контактів на основі срібла до арсеніду галію за різних температурних режимів та визначають умови стабілізації електрофізичних параметрів контактів у процесі їх створення.

Експериментально встановлено, що якісні показники омичних та інжектуючих бар'єрних переходів значно залежать від температури підкладки та режимів термообробки контактної структури. Встановлено закономірності залежності питомого перехідного опору від температурних режимів створення омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, за яких відбувається зменшення питомого перехідного опору до мінімального значення $(5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, що на порядок менше порівняно з відомими аналогами. Доведено, що якість омичного контакту покращується, якщо GaAs-підкладку після хімічної обробки у сірчанокислому травнику витримати у діоксіянтарній кислоті та додатково відпалити у вакуумі.

Удосконалено та оптимізовано технологію виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, яка враховує закономірності формування бар'єрних переходів за різних температурних режимів та визначено оптимальні режими, які обумовлюють зростання висоти бар'єру Шотткі до 0,98 В.

Встановлено, що реальні вольт-амперні характеристики бар'єрних переходів метал-напівпровідник залежать від технології їх виготовлення. Проте точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти бар'єру ϕ_B та фактору неідеальності η) залежить не тільки від точності вимірювання струму й напруги, але й від методу їх визначення.

Розглянуто й апробовано методи визначення висоти бар'єра Шотткі за вольт-амперними характеристиками на прикладі бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених за різних режимів термообробки. При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру рекомендується метод прямої апроксимації (direct approximation), оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$. На основі

експериментальних досліджень встановлено, що висота бар'єру $\phi_{\text{Вп}}$, яка визначається за ВАХ, є чутливою до напруги.

Запропоновано спрощену математичну модель МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі, яка може бути використана для розрахунку параметрів складних багатофункціональних МЕР-приладів з кількома керуючими електродами. На основі моделі розроблено багатоелектродний МЕР-прилад з розширеними функціональними можливостями, до складу якого входять омичні контакти, електроди з бар'єрами Шотткі та керуючі електроди, розташовані над областю розповсюдження біжучої хвилі. Вказаний прилад при визначених режимах здатен виконувати функції діоду Шотткі, транзистору біжучої хвилі або НВЧ генератору, що дозволить отримати техніко-економічний ефект за рахунок зменшення витрат на розробку ряду приладів для НВЧ діапазону.

Ключові слова: GaAs, омичні та інжектуючі бар'єрні переходи, коефіцієнт інжекції, срібло, потрійний сплав, МЕР-прилад.

ABSTRACT

Dmytriiev V. S. Ohmic and injection barrier transitions to gallium arsenide. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The dissertation for the candidate of technical sciences degree (comparable to the Academic Degree of Doctor of Philosophy) on specialty 05.27.06 - Technology, equipment and production of electronic technique. - Engineering Institute of Zaporizhzhya National University, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of a technology for reproducible manufacturing ohmic and injection barrier transitions based on the silver to gallium arsenide of n-type conductivity.

The development of mobile communications, high-speed wireless telecommunication facilities and fiber optic systems requires the use of modern electronic microwave range devices, which are manufactured on the basis of

electronic gallium arsenide. The one of the microwave devices main elements is the ohmic and injection barrier transitions, made in particular of gold-based material.

The problem of lack knowledge about the regularities and peculiarities of the silver-containing metal-GaAs contacts formation necessitates further research to improve the industrial technology of manufacturing GaAs devices with silver metallization.

Using silver, which has the advantages of higher thermal and electrical conductivity, a relatively small diffusion coefficient for gallium arsenide, and a lower cost to create these transitions, we could improve the technical characteristics of Schottky microwave devices.

The influence of various factors on the quality of ohmic and injection barrier transitions to gallium arsenide is analyzed.

It is established that the physical model of the real metal-semiconductor contact (MSC) is more complicated comparing to the ideal MSC models. A model, which describes the transport processes between metal electrons, boundary states, and free semiconductor carriers has got further developed. This model allows us to study the real metal-semiconductor structure taking into account the influence of the effects of fast and slow states and the intermediate oxide layer influence in general. It can take into account any physical mechanism of charge transfer in the metal-semiconductor structure by appropriate selection of kinetic coefficients in transfer processes.

The analysis of the basic calculation relations for describing of the different injection types in simple diode structures $R-p^+-n(p)-n^+-R$ having two active injecting barrier transitions and ohmic transitions to low-density regions showed that all mathematical calculations can be used for more complicated structures calculations.

The theoretical studies of the injected non-main charge carrier's influence on the microwave devices with Schottky barriers parameters on the example of the Schottky diode planar construction have been done. Their results proved the

necessity of taking into account the non-main carriers influence in the spetial charge area of Schottky barrier contact, which leads to the appearance of diode's performance characteristics dependence from the injection current, charge accumulation and field distortion in the contact area.

The existing technologies of producing multi-component ohmic and injection barrier transitions based on silver to gallium arsenide have been analyzed.

The real epitaxial films, which are mainly used for the straightening MSC producing, have an uneven impurities distribution that occurs during the film growing process. The electrophysical parameters of the semiconductor's real surfaces become heterogeneous along the surface after processing by existing methods, and therefore it's required the development of more effective GaAs surfaces passivation methods.

It is shown that the existing silver-arsenide gallium ohmic and injection barrier transitions producing technologies have a number of disadvantages, including the contact parameters reproducibility lack. There are also divergences in determining the causes of the current-voltage characteristics deviation from the ideal, which is due to the technological features of their producing.

It is determined that among the most effective ways to control the structure of the metal-semiconductor interface boundary is the thin-film structures annealing, which mechanism has not yet been completely studied and not disclosed. The existing data on the temperature regimes for creating barrier transitions to GaAs are greatly varies. Therefore, the investigation of the metal deposition conditions and heat treatment regimes influence on the electrophysical parameters of metal-GaAs silver-containing contacts is highlighted in an independent scientific problem whose solution can lead to a significant representations refinement of processes in metal-GaAs contacts and will allow to improve the technical characteristics and parameters of microwave GaAs devices with the Schottky barriers in particular, devices with inter-valued electronic transitions (IET-devices). Thus, the study of patterns, the development and optimization of technological regimes for the reproducible manufacturing silver-GaAs based ohmic and injection barrier

transitions with optimal performance and quality characteristics for microwave devices is an important and actual problem both for a scientific and a practical points of view.

The measurement and calculation methods of the ohmic and injection barrier transitions' basic parameters are considered and proposed. The scheme and the method for microwave devices measuring parameters are developed.

The complex technological and electrophysical research of single- and multi-component metal contact systems based on the silver to $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ have been made.

The experimental studies results are complementing the ideas of the patterns of the silver based to gallium arsenide contacts formation at different temperature regimes and determine the conditions of the contacts electrophysical parameters stabilization during their creation process.

It was experimentally established that the qualitative characteristics of ohmic and injection barrier transitions depend heavily on the temperature of the substrate and the contact structure heat treatment regimes. The patterns of the specific transient resistance dependence from the temperature regimes for the creation of ohmic contacts $\text{Ag-Ge-In}/n\text{-n}^+\text{GaAs}$ are established, which leads to the the specific transient resistance reducing to the minimum value $(5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$. It is for an order smaller comparing to known analogues. It has been shown that the quality of the ohmic contact is improved if the GaAs substrate hold in dioxiacaric acid after the chemical treatment in the sulfuric acid and further anneal it in vacuum.

The technology for the production of $\text{Ag}/n\text{-n}^+\text{GaAs}$ injecting barrier transitions are improved and optimized. It takes into account the barrier transitions forming patterns in different temperature regimes. The optimal regimes for the Schottky barrier height increasing up to 0,98 V are determined.

It is established that the real current-voltage characteristics of the metal-semiconductor barrier transitions depend on their manufacturing technology. But the accuracy of the basic barrier transitions qualitative parameters (the ϕ_B barrier height and the nonideality η factor) depends not only on the accuracy of the measurement of current and voltage, but also on the method of their determination.

The Schottky barrier height determining methods based on the current-voltage characteristics using as example the Ag/n-n⁺GaAs barrier transitions, produced under different heat treatment regimes, are analyzed and tested. With a small extension of the exponential partn of the CVC, a direct approximation method is recommended for determining the potential barrier height, since it takes into account the serial resistance and the CVC region at $V < kT/q$. On the basis of experimental studies, it is established that the height of the ϕ_{Bn} barrier, which is determined by the CVC, is sensitive to voltage.

A simplified mathematical model of the IET-device with Schottky barriers is proposed. This model can be used to calculate the parameters of complicated multifunctional IET-devices with several controlling electrodes. On the basis of this model, a multi-electrode IET-device with expanded functionality has been developed. Such a device includes ohmic contacts, electrodes with Schottky barriers and controlling electrodes located above the area of the runway wave spread. This device is capable in certain modes to perform functions of a Schottky diod, an runway wave transistor or a microwave generator, which will allow to obtain a technical and economical effect by the cost reducing for developing of a number devices for the microwave range.

Key words: GaAs, ohmic and injection barrier transitions, injection rate, silver, triple alloys, IET-devices

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. Дмитрієв В. С. Вплив термічної обробки на вольт-амперну характеристику та інжекційні властивості гетеропереходу Ag/n-n⁺GaAs. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запоріжжя, 2018. № 2. С. 7-13. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-1. (фахове видання, індексується у *Web of Science Core Collection, Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI*).

2. Дмитрієв В. С. Вплив способу обробки поверхні GaAs-підкладки на питомий перехідний опір омічних контактів на основі срібла. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2018. №3. С. 258-263. (фахове видання, індексується у *Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI, Polish Scholarly Bibliography*).

3. Дмитрієв В. С. Дослідження основних чинників впливу на якість омічних контактів до тонкоплівкового НВЧ приладу на n-GaAs. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2018. №1. С. 188-193. (фахове видання, індексується у *Google Scholar, RSCI*).

4. Дмитрієв В. С. Омічні контакти на основі срібла для НВЧ приладів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С. 54-57. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у *Google Scholar*).

5. Дмитрієв В. С. Багатокомпонентні омічні контакти до GaAs. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*: електрон. наук. фахове вид. 2017. № 3. С. 1-6. ISSN 2307-5376. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/517>. (фахове видання, індексується *Google Scholar*)

6. Дмитрієв В. С. Інжектуючі бар'єрні переходи на основі арсеніду галію для приладів НВЧ діапазону. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С.50-53. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у *Google Scholar*).

7. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2017. № 4, С. 88-92. ISSN 1997-9266. (фахове видання, індексується у *Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI*).

Статті в інших наукових виданнях України

8. Дмитриев В. С., Дмитриева Л. Б., Швеца Е. Я. Технологические особенности изготовления СВЧ прибора с барьерами Шоттки. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2018. Т. 61, № 2, С.

108-116, DOI: 10.20535/S002134701802005X. (фахове видання, індексується у: *Scopus, Google Scholar, Web of Science Core Collection, RSCI*).

9. Дмитриев В. С. Влияние методов определения параметров барьерного перехода на их точность. *Журнал нано- та електронної фізики* Суми, 2017. Вип. 9, № 5. С. 05037-1 – 05037-5. DOI: 10.21272/jnep. 9 (5).05037. (фахове видання, індексується у *Scopus, Index Copernicus International, Google Scholar*).

10. Dmitriev V. S. The modeling of the metal-semiconductor barrier transitions, which based on the chemical interaction. *SworldJournal*. 2016. Vol. 10. P. 55–58. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11610.pdf>. (індексується у *Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI*).

11. Дмитриев В. С. Моделирование барьерных переходов металл-полупроводник на основе химического взаимодействия. *Научные труды Sword*. Иваново: 2016. Вып. 1(42), Т.4. С. 38–42. (індексується у *Google Scholar, RSCI*).

12. Дмитриев В. С., Швец Е. Я. Анализ экспресс-методов исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов. *Сборник научных трудов Sword*. Иваново, 2013. Вып. 4, Т. 8. С. 59–63. (ISSN2224-0187). (індексується у *Google Scholar, RSCI*).

Патенти

13. Спосіб виготовлення омичного контакту до GaAs: пат. 119444 Україна: МПК H01L 21/28. № u201703416; заявл. 10.04.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. 5 с.

14. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шотткі до GaAs: пат. 119116 Україна: МПК H 01 L 29/47. № u201703427; заявл. 10.04.17; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17. 5 с.

15. Багатоелектродний МЕР-прилад: пат. 132132 Україна: МПК H01L 29/41, 45/02. № u201809445; заявл. 19.09.18; опубл. 11.02.19, Бюл. № 3. 5 с.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

16. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів термічної обробки гетероструктури на арсеніді галію. *Фізика, електроніка, електротехніка: 2017: Матеріали НТК.*(Суми, 17-21 квітня 2017 р.). Суми, 2017. С. 110.
17. Dmitriev V. Influence of heat treatment on the main quality indicators of heterojunctions Ag/n-n⁺GaAs. *“Litteris et Artibus”*: Матеріали VII міжнародного молодіжного наукового форуму (Львів, 23-25 листопада 2017 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 402-403.
18. Дмитриев В. С. Точность определения параметров гетеропереходов методом вольт-амперной характеристики. *Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології*: матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф. (Одеса, 10-11 жовтня 2017 р.) Одеса: ОДАТРЯ, 2017. С. 63-64. (індексується у *Google Scholar*).
19. Дмитрієв В. С., Швець Є. Я. Дослідження впливу рівня інжекції неосновних носіїв заряду у контактах метал-напівпровідник на параметри напівпровідникових приладів НВЧ діапазону. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.3.
20. Швець Є. Я., Дмитрієв В. С. Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.4.
21. Дмитриев В. С., Швец Е. Я. Экспериментальные исследования влияния уровня инжекции неосновных носителей заряда в контактах металл-арсенид галлия на параметры приборов микроволнового диапазона с барьерами Шоттки. *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке*: материалы 19-го междунар. молодежного форума (г. Харьков, 20-22 апреля 2015 г.). Харьков: ХНУРЭ, 2015. Т. 1. С. 17–18.

22. Дмитрієв В., Швець Є. Вплив інжекттованих неосновних носіїв заряду на параметри діоду з бар'єром Шоттки. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвяч. 55-річчю заснув. ТНТУ та 170- річчю з дня народж. І. Пулюя (Тернопіль, 19–21 травня 2015 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 10–11. (індексується у *Google Scholar*).

23. Дмитриев В. С. Развитие физической модели неоднородных контактов металл-полупроводник. *Moderní vymoženosti vědy – 2014: materialy X mezinárodní vědecko-praktické konference* (Praha, 27.01-05.02.2014) Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. Díl 39 «Technické vědy». С. 3–5. (ISBN 978-966-8736-05-6).

24. Dmitriev V. S., Shvets E. Y. The influence of the semiconductor's surface states on straightening properties of devices. *XVIII НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XVIII наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 15-19 квітня 2013 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2013. Т. 3. – С. 6.

ЗМІСТ

	Стор
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ ЧИННИКІВ НА ЯКІСТЬ ОМІЧНИХ ТА ІНЖЕКТУЮЧИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ...	27
1.1 Фізичні моделі омічних та інжектуючих бар'єрних переходів метал- напівпровідник.....	27
1.2 Модель реального контакту метал-напівпровідник, яка базується на процесах перенесення між електронами металу, граничними станами і вільними носіями.....	32
1.3 Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції у структурах з омічними та інжектуючими бар'єрними переходами.....	43
1.4 Вплив інжекттованих неосновних носіїв заряду на параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі.....	49
1.5 Вплив технології виготовлення на основні параметри омічних та інжектуючих бар'єрних переходів.....	56
1.5.1 Вибір контактних матеріалів для виготовлення омічних та інжектуючих бар'єрних переходів до арсеніду галію.....	57
1.5.2 Аналіз існуючих технологій виготовлення багатокомпонентних омічних переходів на основі срібла до арсеніду галію.....	59
1.5.3 Аналіз існуючих технологій виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію.....	61
1.6. Постановка та обґрунтування завдання дослідження.....	63
Висновки до розділу 1.....	64
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	66

2.1 Основні параметри омичних контактів та методи їх визначення.....	68
2.1.1 Методики вимірювання та розрахунку питомого перехідного опору омичного бар'єрного переходу.....	69
2.1.2 Методика дослідження інжекційних властивостей омичних бар'єрних переходів.....	73
2.2 Основні параметри інжектуючих бар'єрних переходів та методи їх визначення.....	76
2.3 Методика вимірювання параметрів НВЧ приладу.....	77
Висновки до розділу 2.....	80
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ОМІЧНИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ.....	82
3.1 Матеріал контакту.....	83
3.2 Розробка ефективних методів пасивації поверхні GaAs.....	85
3.3 Вплив попереднього відпалу GaAs–підкладки на питомий перехідний опір контакту.....	90
3.4 Вплив режимів нанесення сплаву та термічної обробки омичних бар'єрних переходів Ag-Ge-In/n-n ⁺ GaAs на питомий перехідний опір.....	92
3.5 Інклекційні властивості омичних бар'єрних переходів.....	98
Висновки до розділу 3.....	99
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ТА РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ ІНЖЕКТУЮЧИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ СРІБЛА ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ.....	101
4.1 Особливості методу формування інжектуючих бар'єрних переходів.....	101
4.2 Обробка поверхні GaAs.....	103
4.3 Вплив режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n ⁺ GaAs на їх параметри.....	107
4.4 Вплив методів визначення параметрів бар'єрного переходу на їх точність.....	115
4.4.1 Висота інжектуючого бар'єрного переходу та фактор неідеальності...	117

4.5 Коефіцієнт інжекції γ інжектуючого бар'єрного переходу Ag/n- n ⁺ GaAs.....	128
Висновки до розділу 4.....	131
РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТОНКОПЛІВКОВОГО МЕР-ПРИЛАДУ З БАР'ЄРАМИ ШОТТКІ.....	133
5.1 Спрощена математична модель МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі.....	134
5.2 Конструктивно-технологічні особливості виготовлення МЕР приладу з бар'єрами Шотткі.....	142
5.3 Моделювання тонкоплівкового багатофункціонального МЕР-приладу з кількома керуючими електродами.....	146
Висновки до розділу 5.....	150
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
ДОДАТОК А.....	174
ДОДАТОК Б.....	175
ДОДАТОК В.....	176
ДОДАТОК Г.....	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НВЧ – надвисокі частоти;

МЕП-прилад - прилад з міждолинним електронним переходом;

ДШ – діод Шотткі;

ВАХ -вольт-амперна характеристика;

ϕ_{Bn} - висота бар'єра до напівпровідника n-типу провідності, В;

C_B - бар'єрна ємність, пФ;

R_s - опір розтікання, Ом;

R_c - опір контакту, Ом;

N_D - концентрація донорів в епітаксійному шарі, см^{-3} ;

$d_{\text{еш}}$ – товщина епітаксійного шару, мкм;

$n_{\text{підкл}}$ - концентрація носіїв у підкладці, см^{-3} ;

k - стала Больцмана, Дж/град;

T - температура оточуючого середовища, К;

q - заряд електрона, Кл;

A^{**} - ефективна стала Річардсона, для GaAs $A^{**}=120 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-2}$;

I_s - щільність струму термоемісії, $\text{А}/\text{см}^2$ при $V=0$;

V – прикладена напруга, В;

η - фактор неідеальності;

R_p - шунтуючий опір;

ρ_k - питомий перехідний опір контактів, $\text{Ом}\cdot\text{см}^2$;

a, b - ширина і довжина контакту, см

$\rho_{\text{нп}}$ - поверхневий опір напівпровідника, $\text{Ом}\cdot\text{см}$;

$V_{\text{охол}}, V_{\text{нагр}}$ - швидкості підйому температури відпалу та охолодження після відпалу контакту, К/с

$t_{\text{підкл}}$ – температура підкладки, К;

$t_{\text{відп}}$ – температура відпалу, К

$\tau_{\text{відп}}$ – час відпалу, с;

γ - коефіцієнт інжекції неосновних носіїв;

ВСТУП

Актуальність теми. У останні роки розвиток засобів мобільного зв'язку, високошвидкісних бездротових телекомунікаційних засобів та волоконно-оптичних систем потребує використання сучасних електронних приладів НВЧ діапазону, які виготовляються на основі електронного арсеніду галію. Одними з основних елементів НВЧ приладів є омічні та інжектуючі бар'єрні переходи, виготовлені, зокрема, на основі золота. Однак використання срібла, перевагами якого є більша тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію та менша собівартість для створення цих переходів, має покращити технічні характеристики НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі, зокрема, приладів з міждолинним електронним переходом (МЕП-приладів). Проблема недостатності знань про закономірності та особливості формування срібломістких контактів метал-GaAs обумовлює необхідність подальших досліджень для удосконалення промислової технології виробництва GaAs приладів з металізацією на основі срібла. Електрофізичні параметри реальних поверхонь напівпровідників після обробки існуючими способами стають неоднорідними уздовж поверхні, а отже потребують розробки більш ефективних методів пасивації поверхні GaAs. Відомі дані про температурні режими створення бар'єрних переходів на GaAs дуже різняться. Дослідження впливу умов осадження металу та режимів термообробки контактів на електрофізичні параметри срібломістких контактів метал-GaAs варто виділити у самостійну наукову проблему, вирішення якої може привести до суттєвого уточнення уявлень про процеси у контактах метал-GaAs та дозволить покращити технічні характеристики та параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на GaAs. Таким чином, дослідження закономірностей, розробка та оптимізація технологічних режимів відтворюваного отримання омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs з оптимальними показниками

якості та технологічності для приладів НВЧ діапазону є важливою і актуальною задачею як з наукової так і з практичної точок зору.

Зв'язок робіт з науковими програмами, планами, темами. Напрямок досліджень пов'язаний з науковою тематикою та тематикою навчального процесу кафедри мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії. Частина досліджень виконувалась відповідно до цілей і завдань науково-дослідної роботи №7-*/д12, рег. № 0113U002791 «Радіант – Удосконалення технології створення напівпровідникових приладних структур», яка виконувалась в 2012-2013 рр. та в якій автор брав участь безпосередньо, як старший науковий співробітник.

Об'єктом дослідження є контактні системи на основі срібла до n-GaAs.

Предметом дослідження є технологічні особливості формування омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до n-GaAs для забезпечення оптимальних показників якості і технологічності.

Метою дисертаційної роботи є: дослідження закономірностей, розробка та оптимізація технологічних режимів відтворюваного отримання омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні наукові завдання:

1. Провести комплекс теоретичних та експериментальних досліджень для поглиблення уявлень про фізичну природу контактних явищ в омичних та інжектуючих бар'єрних переходах, проаналізувати відповідні фізичні моделі, визначити методи розрахунку основних параметрів контактів, дослідити вплив різних чинників на якість бар'єрних переходів до арсеніду галію.

2. Визначити контактні системи, найбільш перспективні з погляду можливості відтворюваного отримання омичних контактів з питомим перехідним опором, меншим ніж $7 \cdot 10^{-4}$ Ом·см², та інжектуючих бар'єрних

переходів з висотою потенційного бар'єру, більшою ніж 0,95 В, до арсеніду галію n-типу провідності.

3. Для покращення параметрів омічних та інжектуючих бар'єрних переходів розробити ефективні методи пасивації поверхні GaAs.

4. Дослідити та оптимізувати методи та режими формування омічних та інжектуючих бар'єрних переходів до GaAs.

5. Дослідити вплив методів розрахунку на точність визначення параметрів бар'єрного переходу.

6. Дослідити можливість створення нових типів НВЧ-приладів з бар'єрами Шотткі.

Методи дослідження: Виконані дослідження базувались на фундаментальних положеннях фізики та технології напівпровідникових приладів. Були використані математичні і комп'ютерні методи розрахунку та моделювання, методи графічної обробки експериментальних даних, статистична обробка результатів вимірювань. Робота проводилася з використанням технологічної та вимірювальної бази ТОВ «Елемент-Перетворювач», ТОВ «Універсальне обладнання - Україна», ТОВ «Істрел», Запорізької державної інженерної академії.

Наукова новизна одержаних результатів:

В результаті проведення комплексних технологічних та електрофізичних досліджень одно- і багатокомпонентних металевих контактних систем на основі срібла до $n\text{-}n^+\text{GaAs}$ **вперше** отримані такі наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток модель контакту метал-напівпровідник, яка описує процеси перенесення між електронами металу, граничними станами та вільними носіями напівпровідника, а також враховує фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник при відповідному підборі кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

2. Результати експериментальних досліджень доповнюють уявлення про закономірності формування контактів на основі срібла до арсеніду галію за

різних температурних режимів та визначають умови стабілізації електрофізичних параметрів контактів у процесі їх створення.

3. Експериментально встановлено, що якісні показники омічних та інжектуючих бар'єрних переходів значно залежать від температури підкладки та режимів термообробки контактної структури, а саме:

- встановлено закономірності залежності питомого перехідного опору від температурних режимів створення омічних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, за яких відбувається зменшення питомого перехідного опору до мінімального значення $(5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, що на порядок менше у порівнянні з відомими аналогами;

- удосконалено та оптимізовано технологію відтворюваного виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, яка враховує закономірності формування бар'єрних переходів за різних температурних режимів та визначено оптимальні режими, які обумовлюють зростання висоти бар'єру Шотткі до 0,98 В.

4. На основі розробленої спрощеної математичної моделі МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі отримано співвідношення, які визначають закономірності нарощування у МЕР-приладах НВЧ коливань, залежність часу встановлення коливань від параметрів початкового матеріалу, геометричних розмірів робочого простору та режимів роботи. Також запропоновано і розроблено нові конструктивні та технологічні рішення зі створення МЕР-приладу на n-GaAs.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновано спосіб хімічної обробки GaAs-підкладки у сірчанокиислому травнику з подальшою витримкою у діоксіянтарній кислоті, який призводить до пасивації поверхні арсеніду галію і дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів відповідно запропонованої моделі та покращує якісні й технологічні показники омічних та інжектуючих бар'єрних переходів.

2. Запропоновано та розроблено нові способи виготовлення омичних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію (Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs та Ag/n-n⁺GaAs відповідно) методом вакуумного випаровування, які дозволяють отримати наступні відтворювані контакти з оптимальними параметрами:

- низькоомні омичні контакти з питомим перехідним опором $(5...7) \cdot 10^{-5}$ Ом·см² за рахунок режимів термообробки, які включають нанесення плівки потрібного сплаву при температурі підкладки 420-470 К та відпал напиленої структури при температурі 860 – 890 К;

- інжектуючі бар'єрні переходи з висотою потенційного бар'єру 0,96...0,98 В, при нанесенні срібла за умови температури підкладки 353-533 К та режимі термообробки контакту з відпалом при температурі 713-883 К.

3. Запропоновані технологічні режими виготовлення омичних та інжектуючих бар'єрних переходів можуть бути використані для створення багатоелектродного приладу на міждолинному електронному переході (МЕП-приладу), до складу якого введено керуючі електроди, виготовлені з однакового матеріалу з електродами з бар'єрами Шотткі. Розроблений прилад має розширені функціональні можливості та при визначених режимах може бути використаний у якості діода Шотткі, транзистора біжучої хвилі чи НВЧ-генератора.

Розроблені технологічні режими виготовлення відтворюваних омичних та інжектуючих бар'єрних переходів впроваджені у промислових умовах на ТОВ «Елемент-Перетворювач», ТОВ «Універсальне обладнання – Україна» та ТОВ «Істрел».

Результати, отримані у дисертаційній роботі, використано у методичному забезпеченні при вивченні дисципліни «Напівпровідникові квантові структури та надгратки» у навчальному процесі на кафедрі мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії.

Акти впровадження додаються. Новизна практичних розробок захищена патентами України.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних здобувачем особисто або при його особистій участі. Автор розробив методики проведення експериментів, виконав статистичну обробку отриманих результатів досліджень, брав участь у підготовці наукових публікацій та в розробці винаходів, покладених в основу дисертаційної роботи та захищених патентами України.

Основні результати, отримані в роботах [58,61,108,136-138,156,157,159,160-161,163,164,165,179], належать особисто авторові та є його особистим науковим внеском. Здобувачем встановлено закономірності залежності питомого перехідного опору від температурних режимів створення омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs; удосконалено та оптимізовано технологію виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, визначено закономірності нарощування у МЕР-приладах НВЧ коливань, запропоновано і розроблено нові конструктивні та технологічні рішення зі створення МЕР-приладу на n-GaAs.

У роботах, виконаних у співавторстві особисто Дмитрієву В.С. належать наступні наукові результати: дослідження залежності коефіцієнта інжекції від щільності струму для зразків різної товщини [22], дослідження залежності коефіцієнта інжекції від струму для контактів з різною висотою потенційного бар'єру [53], теоретичні дослідження впливу просторового заряду на основні характеристики приладів з бар'єрами Шотткі [54], аналіз простих діодних структур, за допомогою яких може бути здійснено класичну або подвійну інжекцію [62], дослідження впливу попередньої обробки поверхні напівпровідника на властивості контактів [84]; експериментальні дослідження інжекційних властивостей омичних контактів [126]; участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів [139]; участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів [158], дослідження впливу режимів

термообробки на контактний опір омичного контакту, висоту бар'єру Шотткі, фактор неідеальності і коефіцієнт інжекції [162].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі, були оприлюднені на: Всеукраїнській НТК «Фізика, електроніка, електротехніка: 2017» (2017 р., м. Суми, Сумський державний університет); VII Міжнародному молодіжному науковому форумі “Litteris et Artibus” (2017 р., м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології». (2017 р., м. Одеса, Одеська державна академія технічного регулювання та якості); Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2016» (2016 р., м. Одеса, Проект SWorld); XVIII, XX - науково-технічних конференціях студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (2013, 2015 р., м. Запоріжжя, Запорізька державна інженерна академія); Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.» (2015 р., м. Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки); Міжнародній НТК молодих вчених і студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (2015 р., м. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя); X міжнародній науково-практичній конференції «Modernn vymoženosti vědy – 2014» (2014 р., м. Прага, Чехія); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні інновації у науці, освіті, виробництві та транспорті» (2013 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет, Проект SWorld); у патенті на корисну модель UA 119116 (2017); у патенті на корисну модель UA 119444 (2017); у патенті на корисну модель UA 132132 (2019); наукових семінарах кафедри мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 7 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 5 статей у інших наукових виданнях, 3 патенти на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 184 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота містить 152 сторінки основного тексту, 39 ілюстрацій, 16 таблиць, перелік використаних джерел зі 179 найменувань на 21 сторінці, 4 додатки наведено на 11 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ ЧИННИКІВ НА ЯКІСТЬ ОМІЧНИХ ТА ІНЖЕКТУЮЧИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ

1.1 Фізичні моделі омічних та інжектуючих бар'єрних переходів метал-напівпровідник

Бар'єрні переходи метал-напівпровідник використовують у приладах з бар'єром Шотткі [1-7], найважливішою перевагою яких є те, що їх випрямляючі властивості не погіршуються у НВЧ діапазоні. Друга перевага полягає у тому, що при їх розробці є деяка можливість зміни їх характеристик, яка досягається вибором комбінацій метал-напівпровідник [8-15], технологією виготовлення [10,16-18] і ще рядом факторів [19-22], що досліджуються у даній роботі. При створенні ефективних приладів з бар'єром Шотткі необхідні розробки зі створення вискоефективних омічних контактів до них [23-27].

Омічний або невикривляючий контакт є необхідною складовою частиною будь-якого напівпровідникового приладу або пристрою [28-31].

Відсутність інжекції заряду [33,34], лінійність вольт амперної характеристики та мала величина перехідного опору [35,36] є найважливішою вимогою до електричних властивостей омічних контактів.

На рисунку 1.1 наведені енергетичні діаграми ідеального омічного бар'єрного переходу метал-напівпровідник n-типу. Проте зазвичай він має більш складну структуру.

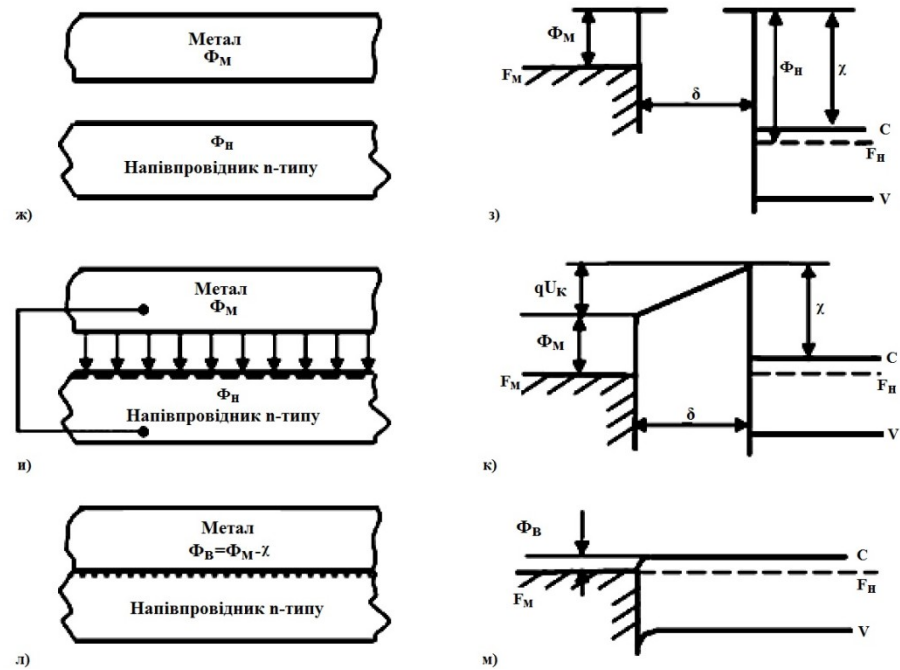


Рисунок 1.1 – Енергетичні діаграми ідеального омічного бар'єрного переходу метал-напівпровідник n-типу [30]

Як відомо [13,29], біля межі напівпровідника з металом може виникати область просторового заряду, пов'язана з наявністю потенційного бар'єру запірного або антизапирного типу, висота якого залежить від різниці робіт виходу напівпровідника і металу та від ступеня заповнення поверхневих станів на межі їх розділу. Крім того, при виготовленні омічних контактів до високоомних матеріалів необхідно заздалегідь легувати приконтakтну область [31] для зниження перехідного опору переходу метал-напівпровідник та надання контакту активних властивостей.

У [37] стверджується, що електрофізичні властивості контакту метал-напівпровідник наближаються до властивостей омічного контакту в трьох випадках коли вигин зон в області ОПЗ напівпровідника антизапирний, коли вигин в області просторового заряду запирний, але ширина області ОПЗ дуже мала, коли запирний вигин в області ОПЗ напівпровідника малий. Але ці теоретичні припущення неповні. На даний час українськими вченими [10,13,23,30,42] запропоновано та експериментально підтверджено новий механізм формування омічного контакту в структурах з великою густиною

дислокацій. Цей механізм не було враховано у [37]. Показано, зокрема, що при достатньо великих рівнях легування напівпровідника врахування просторової залежності густини поверхневих станів призводить до суттєвого зменшення висоти бар'єру, що в свою чергу сприяє реалізації омичних контактів. Експериментально встановлено, що контакти кремній-метал з попередньо шліфованою поверхнею є омичними. Їм властива велика густина дислокацій, достатня для реалізації механізму проходження струму крізь дислокації, пов'язані з металічними шунтами. В роботі [13] показано, що твердження [37] про те, що омичні контакти першого типу (рекомбінаційні) мають безмежно високу швидкість рекомбінації носіїв на межі розділу метал-напівпровідник, є недостовірним та не дозволяє реалізувати омичний контакт.

У найбільш загальному випадку омичним контактом можливо назвати трьохшарову структуру $R-n^+-n$ або $R-p^+-p$, що обмежена з одного боку металом, а з іншого – областю об'ємного заряду n^+-n або p^+-p переходу, роллю якого є ефективна інжекція основних носіїв заряду в об'єм напівпровідника та поглинання або відбивання неосновних носіїв. Переважання поглинання або відбивання визначається типом контакту (рекомбінаційний чи антизапірний) та залежить від функціонального призначення приладу або пристрою.

Омичні контакти першого типу (рекомбінаційні [34,37]) мають безмежно високу швидкість рекомбінації носіїв на межі розділу метал-напівпровідник. Концентрація носіїв на контакті дорівнює рівноважній, а приконтактна область просторового заряду відсутня, такий контакт є ідеальним поглиначем неосновних носіїв заряду. Граничні умови на контакті можуть бути записані таким чином [37]: $p(W)=p_0$, $n(W)=n_0$.

Антизапірний контакт характеризується наявністю у межі напівпровідник-метал тонкого шару з підвищеною концентрацією основних носіїв, який є бар'єром запірного типу для неосновних носіїв. Такий контакт є ідеальним відбивачем неосновних носіїв. Граничні умови [37]: $j_p(W)=0$.

Реальні контакти не є ідеальними поглиначами або ідеальними відбивачами неосновних носіїв. Для характеристики таких контактів вводиться поняття швидкості рекомбінації електронів та дірок: S_n , S_p [34]. Для визначення цих швидкостей існує [34] співвідношення:

$$J_n(W) = qS_n[n(W) - n_0];$$

$$J_p(W) = qS_p[p(W) - p_0].$$

Ці вирази дозволяють отримати граничні умови для ідеальних рекомбінаційного та антизапірного контактів, якщо прийняти $S_n = \infty$, $S_p = 0$.

Інжектуючий бар'єрний перехід (бар'єр Шотткі) виникає на межі контакту напівпровідника з металом (рисунок 1.2).

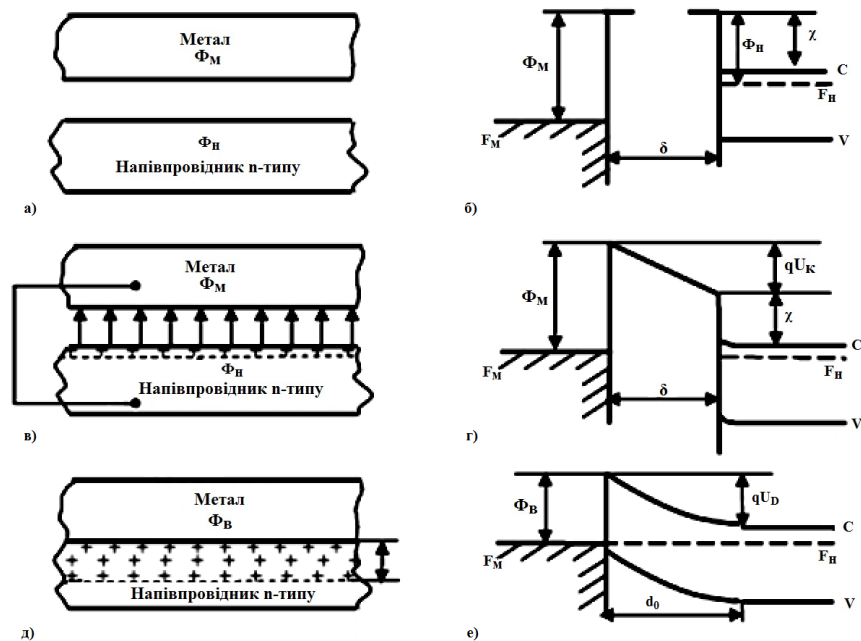


Рисунок 1.2 – Енергетичні діаграми ідеального інжектуючого бар'єрного переходу метал-напівпровідник [30]

Відомо, що випрямлення на переході метал-напівпровідник визначається основними носіями заряду. Впливом неосновних носіїв у більшості випадків нехтують [38-42]. Однак, це не завжди обґрунтовано. У ряді робіт [43-45] показано, що інжекція неосновних носіїв може впливати на вольт-амперну

характеристику контактів з бар'єром Шотткі. Були отримані [46,47] деякі результати щодо коефіцієнту інжекції у особливому випадку контакту метал-напівпровідник з викривленням верхньої смуги.

На висоту бар'єру Шотткі можуть впливати чотири різних механізми провідності (рисунок 1.3) [37,47]. Електрони, що інжектуються у метал з напівпровідника n-типу при прямому зсуві, у металі є гарячими носіями і можуть перетнути бар'єр у зворотному напрямку при негативному зсуві. Процес повернення цих електронів буде продовжуватися доти, поки вони не втратять при зіткненнях стільки енергії, що їх тунелювання крізь бар'єр буде малоймовірним. Швидкість гарячих електронів дорівнює 10^8 см/с, середня довжина вільного пробігу у металі 500 \AA , час розсіювання електронів складає $5 \cdot 10^{-14}$ с [47], що для практичного використання несуттєво.

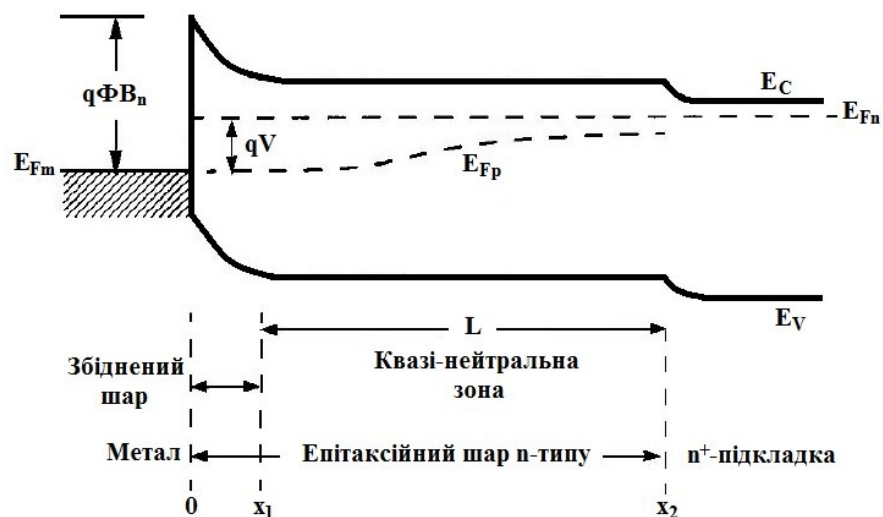


Рисунок 1.3 - Енергетична діаграма епітаксійного бар'єра Шотткі [37]

З іншого боку, у поверхні напівпровідника при його контакті з металом існує інверсний шар з підвищеною концентрацією неосновних носіїв, з якого можлива їх інжекція при прямому зсуві.

Інжекція неосновних носіїв у діодах з бар'єром Шотткі розглядалась у [29,37,46] з точки зору дифузійної теорії. Було встановлено, що при низьких рівнях струму для ідеального контакту метал-напівпровідник коефіцієнт

інжекції неосновних носіїв γ є сталим та лінійно зростає зі струмом (при $i < i_0$).

Зазвичай вважають, що бар'єр Шотткі є ідеальним нелінійним опором [48-50], тобто перенесення зарядів у контакті здійснюється основними носіями. Виходячи з такого припущення діод з бар'єром Шотткі є безінерційним приладом. У цьому випадку швидкодія діоду Шотткі (ДШ) залежить від часу релаксації «гарячих» електронів у металі τ_r , сталої часу $\tau_s = R_s C_B$ (де R_s - опір розтікання, C_B - бар'єрна ємність ДШ). У сучасних ДШ значення R_s може бути зменшено до декількох одиниць Ом, а C_B – до 0,09...0,23 пФ [37]. Тоді стала часу $\tau_s = 10^{-12}$ с. Таким чином встановлено, що величини τ_s та τ_r практично не впливають на швидкодію ДШ.

У роботах [47,51,52] показано, що при більших значеннях струму неосновні носії починають істотно впливати на характеристики діодів. Час життя неосновних носіїв до їх рекомбінації, який зазвичай складає 10^{-7} с, на п'ять-шість порядків перевищує значення часу τ_s та τ_r .

Відомо [37], що кількість неосновних носіїв у ДШ мала. Проте на великих частотах вони можуть впливати на швидкодію ДШ [1,22,53]. У якості оцінки кількості неосновних носіїв у ДШ зазвичай використовують коефіцієнт інжекції γ , що залежить від багатьох фізичних параметрів діоду. У розрахунках [37,51,54] значення γ може змінюватися від 10^{-6} до 1 (наприклад, у випадку контакту Au-n-GaAs - $\gamma = 2 \cdot 10^{-5}$ при концентрації донорної домішки $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, об'ємний час життя неосновних носіїв у n-GaAs $\tau_p = 10^{-9}$ с).

1.2 Модель реального контакту метал-напівпровідник, яка базується на процесах перенесення між електронами металу, граничними станами і вільними носіями

Результати дослідження структури реальних контактів метал-напівпровідник за допомогою електронного мікроскопу просвічуючого типу та розшифровка одержаних електронограм [55] свідчать про утворення між

контактним матеріалом та матеріалом напівпровідникової підкладки проміжного шару [56-59], який має відповідний вплив на електрофізичні параметри бар'єрного переходу.

Визначимо вплив інжекції неосновних носіїв заряду на характеристики омічних та інжектуючих бар'єрних переходів метал-напівпровідник.

Для цього проведемо загальне дослідження контакту метал-напівпровідник, яке дозволить врахувати не тільки внесок двох типів носіїв, а також вплив окисного шару між металом і напівпровідником та граничних станів. Взаємодію між електронами металу, граничними станами і вільними носіями напівпровідника було описано за допомогою процесів перенесення [57]:



де W_i - швидкість процесу перенесення, e_m – вільні електрони металу, e – вільні електрони поверхні напівпровідника, g^+ - іонізований атом на поверхні напівпровідника (щільність g^+ , як у дірок), I_k та I_k^- - домішки: I_k – нейтральна,

I_k^- - негативно іонізована, коли домішка акцепторна, I_k - позитивно іонізована та I_k^- - нейтральна, коли домішка донорна.

Домішки створюють граничний електронний стан (k немає, « k » змінюється від 1 до N). Число « k » прийнято для позначення домішок, що мають однакові властивості. Їх щільність можна записати:

$$I_k + I_k^-.$$

У сталому режимі (що відповідає або не відповідає термодинамічній нерівноважності) можна записати наступні рівняння [59]:

$$J_n = W_1 - \sum_{k=1}^{k=N} W_{4k}, \quad (1.8)$$

$$J_p = W_2 - \sum_{k=1}^{k=N} W_{6k}, \quad (1.9)$$

$$0 = W_{4k} + W_{5k} + \sum_{j=1}^{j=N} W_{kj} \quad (j \neq k), \quad (1.10)$$

де J_n та J_p – електронний і дірковий потоки, що входять у напівпровідник, швидкістю процесу перенесення W_3 нехтуємо. Припустимо, що швидкість прямої рекомбінації вільних носіїв напівпровідника на поверхні дуже низька.

Рівняння (1.10) означає, що швидкість зміни щільності I_k^- дорівнює нулю у стабільному режимі.

У роботах [37,60] досліджено вклад потоку неосновних носіїв в загальний потік шляхом вивчення коефіцієнта інжекції неосновних носіїв γ в матеріалі n -типу.

$$\gamma = \frac{J_p}{J_p - J_n} = \frac{i_p}{i_p + i_n}. \quad (1.11)$$

Аналогічне вивчення може бути проведено у випадку напівпровідника p -типу.

Ідеально близький контакт метал-напівпровідник без проміжного окисного шару та поверхневих станів .

У випадку ідеально близького контакту метал-напівпровідник без проміжного окисного шару та поверхневих станів вираз для i [57] зменшується до:

$$i = -e(W_1 + W_2) = i_n + i_p. \quad (1.12)$$

$$i_n = -eW_1, \quad i_p = -eW_2, \quad W_1 = \overrightarrow{k_1} n_m - \overleftarrow{k_1} n_s,$$

де n_m та n_s – щільності вільних електронів у металі та на поверхні напівпровідника; $\overrightarrow{k_1}$ та $\overleftarrow{k_1}$ – кінетичні коефіцієнти процесу перенесення. При термодинамічній рівновазі можна записати:

$$\overrightarrow{k_1} n_m = \overleftarrow{k_1} n_{s0},$$

де n_{s0} – щільність вільних електронів на поверхні напівпровідника при рівновазі:

$$n_{s0} = n_0 \exp\left(\frac{eV_{s0}}{kT}\right),$$

V_{s0} – поверхневий потенціал (негативний, якщо маємо збагачений або збіднений поверхневий шар у напівпровіднику n-типу), n_0 – об'ємна щільність електронів з $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, тоді:

$$W_1 = \overleftarrow{k_1} (n_{s0} - n_s).$$

Припустимо, що перетин шару просторового заряду напівпровідника виконується без помітної зміни електрохімічного потенціалу електронів при малій товщині цього шару [57]. Тоді:

$$W_1 = \overline{k_1} \exp\left(\frac{eV_{s0}}{kT}\right) \left[n_0 - n \exp\left(\frac{e\delta V_s}{kT}\right)\right] = A_0(n_0 - n\alpha),$$

де δV_s - падіння потенціалу V від металу до об'єму напівпровідника (зовнішнє зміщення). Нехтуємо падінням потенціалу у об'ємі напівпровідника. Приймаємо, що тильний контакт є омичним. Тоді вираз для W_2 :

$$W_2 = B_0 \left(\frac{p}{\alpha} - p_0\right),$$

де $B_0 = \overline{k_2} n_m \exp\left(\frac{-eV_{s0}}{kT}\right)$, p та p_0 – це нерівноважна та рівноважна діркові щільності. Тоді густину струму можна записати:

$$i = eA_0(n\alpha - n_0) + eB_0\left(p_0 - \frac{p}{\alpha}\right) = i_n + i_p. \quad (1.13)$$

Якщо застосувати, наприклад, термодинамічну теорію контакту метал-напівпровідник [57,58], можливо визначити $A_0 n_0$ та $B_0 p_0$:

$$A_0 n_0 = A_n T^2 \exp\left(\frac{-\Phi_n}{kT}\right);$$

$$B_0 p_0 = A_p T^2 \exp\left(\frac{-\Phi_p}{kT}\right),$$

де значення коефіцієнтів дане у [33]. Якщо не брати до уваги рекомбінацію в шарі просторового заряду, i_n та i_p залишаються постійними, коли цей шар перетинається; тому можна написати, що на межі об'єму напівпровідника:

$$i_n = -e \frac{D_n}{l} \delta n + e \mu_n n E, \quad (1.14)$$

$$i_p = e \frac{D_p}{l} \delta p + e \mu_p p E, \quad (1.15)$$

$$\delta n = \delta p = n - n_0 = p - p_0,$$

де E – електричне поле, $\delta n = \delta p$ – надлишок щільності (нейтральний стан), l – довжина структури, яка вважається малою у порівнянні з амбіполярною дифузійною довжиною.

З рівнянь (1.13-1.15) n та E нікчемно малі. Вирази для i_n та i_p виводяться як функції падіння потенціалу V крізь структуру [59]; тоді можливо буде визначити залежність загальної густини струму від коефіцієнту інжекції неосновних носіїв.

На рисунку 1.4 [59] наведено залежність коефіцієнту інжекції неосновних носіїв від густини струму для різних значень: $\eta = B_0/A_0$; цей параметр:

$$\eta = \exp\left(-2e \frac{V_{s0}}{kT}\right)$$

у випадку термодинамічної теорії [60], коли ефективні маси електрону та дірки приймають рівними.

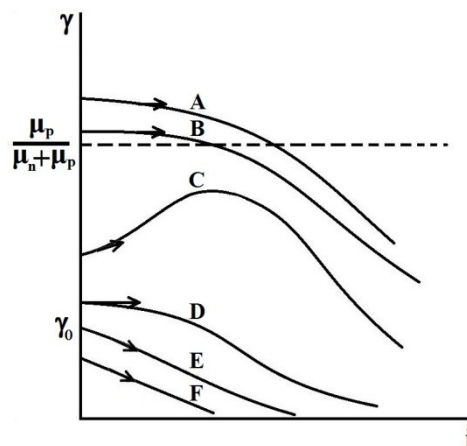


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнту інжекції неосновних носіїв від густини струму (безпосередній контакт метал-напівпровідник)

Форма кривих для бар'єрів різної висоти (рисунок 1.4) змінюється від різко спрямованої до низу смуги (крива F) до верхньої (крива A). $\gamma_0 = r_0 \mu_p (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$ - обмежувальне значення.

Можливо відмітити наступне:

Коефіцієнт γ прагне до нуля при високій густині струму. Цей ефект пов'язаний з витягування вільних носіїв, що проходить при значному зміщенні.

При будь-якому значенні густини струму γ – зростаюча функція η ; в особливості коли густина струму прагне до 0 та для високих значень η (тобто для великих негативних значень V_{s0} з вигином верхньої смуги) прагне до одиниці.

Для $\eta = \mu_p / \mu_n$ та i , яке прагне до нуля, γ прагне до значення:

$$\gamma_0 = \frac{\mu_p p_0}{\mu_p p_0 + \mu_n n_0}.$$

Взагалі існує область значень η ($\eta > \frac{\mu_p}{\mu_n}$), усередині якої криві $\gamma(i)$ мають максимум, а перед тим, як досягти цього максимуму, γ збільшується лінійно з густиною струму.

Поза області цих значень η , γ є монотонно спадною функцією густини струму. Іншими словами останнє має місце при дуже сильному вигині зовнішньої поверхні смуги, з одного боку, та з іншого боку при плавному переході та вигині нижньої смуги.

Дослідження [57-59] показує, що для тонких структур ($l < 1 \mu\text{m}$ для GaAs, Ge, Si) або у випадку наближеному до власної провідності γ - завжди монотонно спадаюча функція густини струму.

Вплив проміжного окисного шару.

Якщо є окисний шар, то кінетичні коефіцієнти процесу перенесення (1.8), (1.9) більше не є константами, тому що взаємодіючі компоненти мають не однаковий електричний потенціал. Для їх взаємодії вони повинні перепнути окисний шар, що підтримує падіння потенціалу U_s від металу до напівпровідника. Згідно [57]:

$$\overleftarrow{k_1}/\overrightarrow{k_1} = c_1 \exp\left(\frac{eU_s}{kT}\right), \quad (1.16)$$

$$\frac{\overleftarrow{k_2}}{\overrightarrow{k_2}} = c_2 \exp(eU_s/kT). \quad (1.17)$$

Для рівнянь (1.16), (1.17) c_1 і c_2 – константи, які не залежать від потенціалів.

Вирази для W_1 та W_2 : подібні вищеведеним:

$$W_1 = A[n_0 - n \exp(eV/kT)], \quad (1.18)$$

$$W_2 = B[p \exp(-eV/kT) - p_0]. \quad (1.19)$$

V – зовнішнє зміщення, відмінне від δV_s : $V = \delta V_s + \delta U_s$.

$$A = \left(\frac{\overleftarrow{k_1}}{\overrightarrow{k_{10}}}\right) \overleftarrow{k_{10}} \exp\left(\frac{eV_{s0}}{kT}\right), \quad (1.20)$$

$$B = \left(\frac{\overleftarrow{k_2}}{\overrightarrow{k_{20}}}\right) \overrightarrow{k_{20}} \exp\left(-\frac{eV_{s0}}{kT}\right) n_m. \quad (1.21)$$

$\overrightarrow{k_{10}}$ та $\overleftarrow{k_{10}}$ – кінетичні коефіцієнти при нульових значеннях зміщення. З (1.16), (1.17), (1.18), (1.19) виходить, що A – спадна функція зміщення напруги, в той час як B – функція того ж параметру, що збільшується.

A і B залежать від $\alpha = [\exp(eV/kT)]$ як наслідок з $A = A_{(V=0)} \alpha^{-m}$, $B = B_{(V=0)} \alpha^m$.

Показник ступеня m є реальним позитивним числом, яке не повинне перевищувати одиницю [57,60]; дійсно можна показати, що умова $m > 1$ веде до електронного (для $V < 0$) чи діркового ($V > 0$) струму, котрий протікає крізь контакт у напрямку збільшення потенціалу. $m = 0,5$ – це критичне значення.

Насправді можливо сказати, з одного боку, що для $m < 0,5$ явище витягування ($\delta n < 0$) має місце для будь-якого напрямку загального струму, а з іншого боку, для $m > 0,5$ ефекти інжекції мають місце ($\delta n > 0$) при будь-якому напрямі струму, так що контакт не стає більш випрямляючим. Ці теоретичні результати добре поєднуються з експериментальним вивчення поведінки δn ,

виконаним [59], добре показано, що при $m > 0,5$ контакт метал-напівпровідник є невипрямляючим.

Для $m < 0,5$ поведінка γ подібна описаному раніше (рисунок 1.4 [59]); тим не менш, область η значень ($\eta > \mu_p/\mu_n$), в якій γ має максимум, розшириться [59].

У випадку $m > 0,5$ γ прагне до $\mu_p/(\mu_p + \mu_n)$ для значних густин струму (рисунок 1.5). Явище витягування зникає та має місце висока інжекція вільних носіїв, оскільки окисний шар підтримує головну частину зовнішнього зміщення; далі, на межі напівпровідникового об'єму дифузійним струмом можна знехтувати, в порівнянні його зі струмами поля провідності.

У другому випадку при наявності окисного шару з'являється мінімум на кривих $\gamma(i)$ для значень η , менших за η_m ($\eta_m < \mu_p/\mu_n$). Для будь-яких $\eta > \eta_m$ нульового зміщення нахил кривих $\gamma(i)$ завжди позитивний.

Можливо показати, що наявність окисного шару «перетворює» криві А, В, С,... (рисунок 1.4) в криві А, В, С,... (рисунок 1.5) [60]. З цього порівняння видно вплив окисного шару.

Вплив окисного шару на поведінку $\gamma(i)$ особливо видно (рисунок 1.5) при порівнянні кривих на рисунках 1.4 та 1.5, позначених однією літерою, тобто відповідних однаковій поверхневій висоті бар'єру (γ_0 – обмежувальне значення, як на рисунку 1.4).

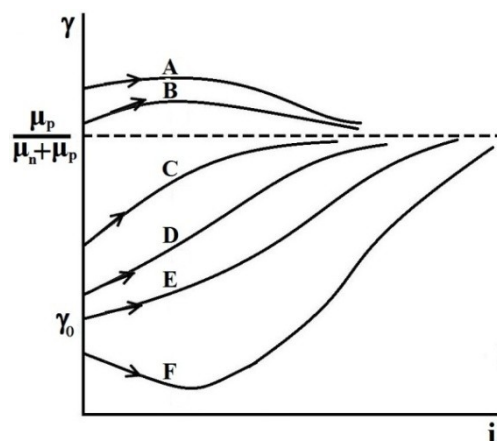


Рисунок 1.5 - $\gamma(i)$ криві для $m > 0,5$

У випадку $m=0,5$ межа γ_i коефіцієнта γ при високих значеннях струму залежить від η , проте не перевищує $\mu_p/(\mu_p+\mu_n)$.

Вплив граничних станів.

а) Безпосередній контакт. Обмежимо розрахунки одним видом поверхневих станів ($N=1$). Враховуючі рівняння (1.11), (1.12), (1.13), густину струму представимо, як:

$$\begin{aligned} i &= -e(W_1 + W_2 + W_{5k}) = i_n + i_p, \\ i_n &= e(W_{4k} - W_1) = -e(Dn/l)\delta n + e\mu_n nE, \\ i_p &= -e(W_2 + W_{6k}) = e(Dp/l)\delta p + e\mu_p pE. \end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned} W_{4k} &= \overrightarrow{k_4} \left(n_s I - \frac{n_{s0} I_0}{I_0^-} I^- \right), \\ W_{5k} &= \overleftarrow{k_5} \left(\frac{I_0^-}{I_0} I - I^- \right), \\ W_{6k} &= \overrightarrow{k_6} \left(p_s I^- - \frac{p_{s0} I_0^-}{I_0} I \right), \\ W_{5k} &= W_{6k} - W_{4k}. \end{aligned}$$

Індекс нуль означає термодинамічну рівновагу.

Знехтувавши δn , E , I ($I+I=I_0+I_0$), знаходимо i_n та i_p для функцій зміщення. Тому γ – функція загальної густини струму.

У випадку безпосереднього контакту [60] тільки швидкі поверхневі стани меж можуть впливати на γ . Дійсно, процеси перенесення, що мають повільні граничні стани, мають низькі кінетичні коефіцієнти та їх внесок у i_n та i_p незначний.

Для $\eta > \mu_p/\mu_n$ (верхня поверхня смуги вигину) γ завжди зменшується [60] у присутності граничних станів. Для нижньої поверхні смуги вигину ($\eta < \mu_p/\mu_n$) γ завжди збільшується [57].

Для $\eta \approx \mu_p / \mu_n$ γ збільшується у присутності діркових пасток та зменшується у присутності електронних [57].

Коли кінетичні коефіцієнти процесів перенесення, що включають граничні стани, наближуються до невизначеності, γ наближується до γ_0 [57]:

$$\gamma_0 = \frac{\mu_p p_0}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0}.$$

Контакт стає омичним.

б) З окисним шаром. У випадку з окисним шаром ефект швидких граничних станів якісно аналогічний (а). Повільні поверхневі стани можуть мати важливе значення. Оскільки їх щільність (10^{13} см^{-2}) значно вище, ніж швидких станів (10^{11} см^{-2}) [57,59], вони можуть екранувати об'єм напівпровідника від прикладеного поля. Тобто процеси перенесення, які включають повільні стани, протікають у такому напрямі, що головна частина падіння напруги відбувається у окисному шарі. Цей ефект є результируючим у збільшенні параметру m та, відповідно, у збільшенні інжекції (γ).

Отримано загальний розв'язок коефіцієнта інжекції неосновних носіїв γ на контакті метал-напівпровідник. Особливість цього методу полягає у тому, що він дозволяє вивчати реальну структуру метал-напівпровідник. Він враховує ефект швидких та повільних станів та вплив проміжного окисного шару у цілому. Цей метод дозволяє визначити достатню кількість нових даних відносно поведінки коефіцієнта γ .

Таким чином встановлено:

1. На залежності $\gamma(i)$ існує максимум тільки всередині визначеної області значень поверхневого потенціалу. Поза цією областю γ є функцією щільності струму, що монотонно зменшується (всупереч загальноприйнятій поведінці γ).

2. Доведено, що проміжний окисний шар може сильно змінити форму залежностей $\gamma(i)$, отриманих у випадку безпосереднього контакту.

3. Вплив швидких поверхневих станів межі контакту залежить головним чином від їх «пасткових» властивостей, в той час як повільні граничні стани реальної структури (з окисним шаром) можуть радикально змінити залежність коефіцієнта інжекції γ від загальної густини струму.

4. Цей метод може легко врахувати будь який фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

1.3 Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції у структурах з омічними та інжектуючими бар'єрними переходами

Перше класичне визначення інжекції було дано Шоклі, Браштейном, Бардіним [34,37,39]. Під інжекцією розуміли емісію р-n переходом носіїв в об'єм напівпровідника, тобто дірок у n-тип, а електронів у р-тип, кількість яких значно поступається рівноважній концентрації основних носіїв заряду. Такий режим роботи напівпровідникових приладів отримав назву малого рівня інжекції. Інкєкція полягає в основі роботи малопотужних випрямлячів, детекторів, імпульсних діодів, транзисторів, світлодіодів та інших пристроїв.

Холл [37] назвав інжекцією емісію в об'єм напівпровідника дірок р-n-переходом та електронів n-n⁺-переходом в кількості, що значно перевищує рівноважну концентрацію. Даний режим роботи було названо високим рівнем інжекції. Потім це явище, пов'язане зі значною модуляцією опору товщини напівпровідника, у роботах Ламперта та Роуза [29,30] було названо біполярною або подвійною інжекцією. Воно полягає в основі роботи потужних діодів, транзисторів, перемикачів, модуляторів та обмежувачів НВЧ потужності, а також діодних джерел випромінювання.

Мотт і Генрі [39,40] ще до відкриття класичної інжекції довели можливість протікання у твердих тілах уніполярного потоку носіїв,

аналогічно струму, обмеженого об'ємним зарядом у вакуумі. За аналогією з подвійною інжекцією у подальшому це явище можливо назвати уніполярною інжекцією або струмом, обмеженим об'ємним зарядом. Воно полягає в основі дії діелектричних діодів та уніполярних транзисторів.

Для аналізу розглянуто прості діодні структури, за допомогою яких може бути здійснена класична та подвійна інжекція.

На рисунку 1.6 [62] представлена структура, яка має два активні інжектуючі бар'єрні переходи та омічні бар'єрні переходи до низькоомних областей. Для виконання умов уніполярної інжекції дірок p^+ -шар має бути замінено d^+ -шаром, для уніполярної інжекції електронів необхідно два n - n^+ переходи.

Більш складні напівпровідникові структури розглядатися не будуть, тому що усі математичні викладки, які характерні для аналізованих діодних структур, можуть бути використані для розрахунку більш складних структур.

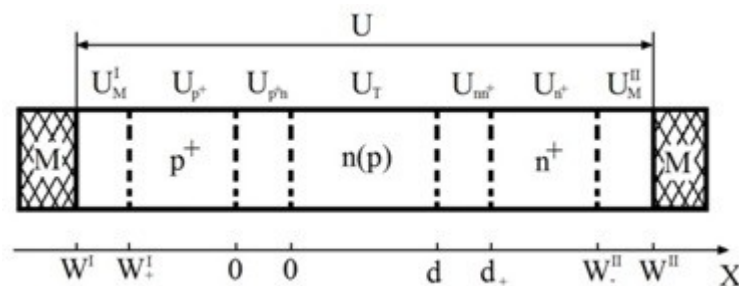


Рисунок 1.6 – Схема R – p^+ - $n(p)$ - n^+ –R структури

При аналізі p^+ - $n(p)$ - n^+ -структури параметри сильнолегованих p^+ та n^+ областей мають надрядкові індекси I та II, відповідно, параметри слаболегованої області індексів не мають.

В основі розрахунку носіїв та полів у об'ємі лежить система рівнянь Херінга та Рігтнера [46,47], яка для одномірної пласкої моделі може бути записана наступним чином:

$$j_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1.22)$$

$$j_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1.23)$$

$$j = j_p + j_n + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{dE}{dt}, \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x}, \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x}, \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n - N_d - N_a). \quad (1.27)$$

Система (1.22) – (1.27) є окремим випадком рівнянь Максвелла [37], котрі не враховують магнітних ефектів. Вирази (1.22), (1.23) – це визначення щільностей діркового та електронного струмів як суми дрейфової та дифузійної компонент; повний струм (1.24) дорівнює сумі діркового та електронного струмів провідності та струму зміщення (останнім зазвичай зневажають); (1.25) та (1.26) рівняння безперервності для дірок та електронів; (1.27) – рівняння Пуассона, у якому враховується заряд рухливих носіїв, донорів та акцепторів. Величини τ_p та τ_n визначаються умовами рекомбінаційних процесів та можуть бути розраховані з розв’язку кінетичних рівнянь [37]. Розглянемо стаціонарні процеси [37]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} = 0.$$

З рівняння безперервності у цьому випадку виходить, що

$$\frac{\partial j}{\partial x} = 0,$$

тобто

$$\frac{\Delta p}{\tau_p} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}.$$

Однак навіть у стаціонарному стані перетворення системи (1.22) – (1.27) призводить до нелінійних рівнянь другого порядку для $p(x)$ та $n(x)$, які у загальному вигляді не мають аналітичного розв’язку, тому використовують

чисельні методи, або знаходять приблизний розв'язок, застосовуючи спрощуючі варіанти. Зазвичай використовуються наступні апроксимації [46,47]:

1. Вважається, що можливий поділ розглянутої $R-p^+-n(p)-n^+-R$ структури на відносно широкі квазінейтральні області та вузькі (порівняно з дифузійною довжиною) шари об'ємного заряду p^+-n та $n-n^+$ переходів та приконттактних областей.

2. У квазінейтральних областях використовують наближення малого або низького рівня інжекції. Розподіл носіїв визначається з «дрейфового» чи «дифузійного» рівнянь.

3. Передбачається, що у квазінейтральних областях має місце рівномірний розподіл легуючої домішки, а в шарах об'ємного заряду переходів – ступінчатий або лінійний.

Для подальшого аналізу сумарні концентрації електронів і дірок у об'ємі напівпровідника зручно поділити на рівноважні n_0 , p_0 та нерівноважні чи надлишкові $\Delta n = n - n_0$, $\Delta p = p - p_0$. В залежності від того, яка з цих частин домінує, розрізняють режим малого ($\Delta n \ll p_0$, $\Delta p \ll n_0$) чи високого ($\Delta n \gg p_0$, $\Delta p \gg n_0$) рівня інжекції. Для визначення у подальшому буде розглядатися напівпровідник n-типу. Напруженість електричного поля легко знайти підсумувавши (1.22) та (1.23)

$$E = \frac{j}{q\mu_p[b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p]} - \frac{kT}{q} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{b-1}{b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p} . \quad (1.28)$$

Виключаючи з (1.22) та (1.23) поле, вираз для діркового та електронного струмів можливо записати наступним чином:

$$j_p = \frac{j(p_0+\Delta p)}{b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p} - qD_p b \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n_0+\Delta n+p_0+\Delta p}{b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p} , \quad (1.29)$$

$$j_n = \frac{j(n_0+\Delta n)}{b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p} + qD_n b \frac{\partial p}{\partial x} \frac{n_0+\Delta n+p_0+\Delta p}{b(n_0+\Delta n)+p_0+\Delta p} , \quad (1.30)$$

В режимі малого рівня інжекції співвідношення (1.29) та (1.30) матимуть вигляд:

$$j_p = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{p}{bn_0}, \quad (1.31)$$

$$j_n = qD_n \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{bn_0}{bn_0 + p}. \quad (1.32)$$

Підставляючи (1.31) в (1.25) та (1.32) в (1.26) отримаємо дрейфово-дифузійне рівняння для визначення розподілу носіїв в режимі малого рівня інжекції:

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{j}{bqn_0} \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (1.33).$$

У випадку $\frac{j_p}{j_n} \gg \frac{p}{bn_0}$, воно зводиться до дифузійного рівняння Шоклі [39]:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{D_p \tau_p}, \quad (1.34)$$

а у випадку $\frac{j_p}{j_n} \ll \frac{p}{bn_0}$, - до дрейфового рівняння:

$$\frac{j}{qbn_0} \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

При лінійній рекомбінації можливо ввести поняття дифузійного поля [50]:

$$E_{\text{диф}} = \frac{kT}{q} \frac{1}{L_p},$$

тоді дифузійне наближення теорії справедливе при $E \ll E_{\text{диф}}$, а дрейфове – при $E \gg E_{\text{диф}}$. У режимі високого рівня інжекції вирази (1.29) та (1.30) мають вигляд:

$$j_p = \frac{j}{b+1} - 2qD_p \frac{b}{b+1} \frac{dp}{dx}, \quad (1.35)$$

$$j_n = \frac{bj}{b+1} - 2qD_p \frac{b}{b+1} \frac{dp}{dx}. \quad (1.36)$$

Вважаючи, що у квазінейтральній області у рівноважних умовах нерівноважні носії та поля відсутні, тобто: $p_0 - n_0 + N_d - N_a = 0$, віднімаючи цей вираз з (1.27) отримаємо:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} (\Delta p - \Delta n). \quad (1.37)$$

Рівняння для розподілу нерівноважних носіїв у режимі високого рівня інжекції можливо отримати з загальної системи рівнянь, якщо підставити (1.22) у (1.25), а (1.24) у (1.26) та скласти отримані вирази, замінивши відповідно до рівняння Пуассона (1.37) $\Delta p - \Delta n$ на $\frac{\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{dE}{dx}$, отримаємо наступний вираз:

$$(p_0 - n_0) \frac{dE}{dx} + \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} \frac{d}{dx} \left(E \frac{dE}{dx} + \frac{2kT}{q} \frac{d^2 p}{dx^2} \right) = \frac{b+1}{b\mu_p} \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (1.38)$$

В залежності від того, який з доданків у лівій частині (1.38) є основним, розподіл носіїв визначається з розв'язку дрейфового або дифузійного рівнянь. Якщо домінує лише перший доданок, отримаємо дрейфове рівняння при умові переваги омічної релаксації, а якщо тільки другий доданок, то маємо дрейфове рівняння, причому час релаксації визначається часом прольоту. Якщо домінує тільки третій доданок, то отримаємо дифузійне рівняння, котре у випадку лінійної рекомбінації матиме вигляд:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p}{L_p^2}. \quad (1.39)$$

Також варто відзначити, що дифузійні довжини L_p та L'_p можуть значно відрізнятися, оскільки величини часу життя при малому та високому рівнях інжекції відрізняються. Рівняння (1.39) лежить в основі численних дифузійних теорій подвійної інжекції [47,48]. На відміну від дрейфових теорій [37] останні отримали назву не через механізм переносу електричного струму, а внаслідок виду диференційного рівняння, оскільки часто у цьому випадку дрейф є не тільки істотним, але й переважаючим.

1.4 Вплив інжекттованих неосновних носіїв заряду на параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі

Неосновні носії заряду відіграють істотну роль при випрямленні на бар'єрі Шотткі [63-67]. Цей вплив досліджувався в режимах середніх і великих сигналів в роботах [37,68-70] і в режимі малих постійних і змінних сигналів для високоомних напівпровідників з неоднорідним розподілом легуючої домішки в області бар'єру в роботі [71]. В рамках теорії термоіонної емісії розглядався вплив граничних умов [51], в тому числі і для основних носіїв заряду [37].

Вихідною системою рівнянь є рівняння Пауссона, рівняння дифузії і рівняння безперервності (1.22-1.27).

Для аналізу розглянемо, наприклад, планарну конструкцію діода Шотткі з рівномірним розподілом легуючої домішки й омічними контактами (рисунок 1.7).

Для n-напівпровідника струм основних носіїв описується виразом [54]:

$$J_n|_{x=0} = qV_{nr}(n_s - n_0), \quad (1.40)$$

де n_s - поверхнева концентрація електронів; n_0 - концентрація електронів на поверхні, розрахована з використанням рівня Фермі в металі; V_{nr} - швидкість рекомбінації:

$$V_{nr} = (AT^2) \cdot (qN_c),$$

де A - постійна Річардсона; N_c - ефективна густина станів у зоні провідності; T - температура. Для кремнію $V_{nr} \sim 2,2 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [30] при кімнатній температурі.

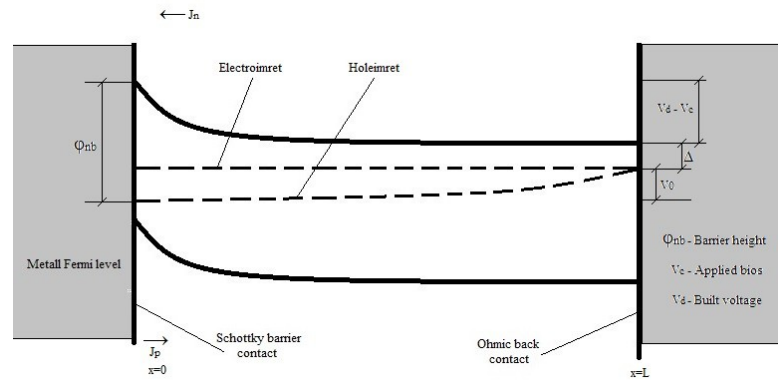


Рисунок 1.7 - Зонна діаграма діода Шотткі [54]

Струм неосновних носіїв, яким зазвичай нехтують при розрахунках, описується таким чином [54]:

$$J_p|_{x=0} = -qV_{pr}(p_s - p_0), \quad (1.41)$$

де позначення мають такий самий фізичний зміст, що й у формулі (1.40). Для кремнію $V_{pr} \sim 1,3 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [38]. Для з'ясування фізичної картини явища слід точно розв'язати (1.40, 1.41) систему (1.22-1.27) з урахуванням граничних умов [39]. При цьому передбачається, що величини струмів досить малі, щоб не впливало обмеження просторовим зарядом [54].

Розглянемо вплив, який має просторовий заряд на характеристики приладів з бар'єрами Шотткі.

Повна щільність заряду в збідненій області має вигляд $p=p_r-n+N_d$ й обумовлена великою концентрацією неосновних носіїв в приконтактній області. Для великих бар'єрів у приконтактній області виникає інверсний шар. При нульовому зміщенні поля контакту E_c дорівнює [37]:

$$E_c = \left\{ \frac{2qN_d}{\epsilon} \left[V_d - \frac{kT}{q} \left(1 - \frac{p_0}{N_d} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (1.42)$$

де V_d - контактний потенціал діода.

Поле у поверхні напівпровідника знижується, а бар'єр Шотткі стає більш прозорим. Цей ефект стає помітнішим для великих бар'єрів і напівпровідників з малим рівнем легування.

Для матеріалу n-типу інверсний шар виникає, якщо виконується умова [37]:

$$\phi_{Bn} > E_g - \frac{kT}{q} \ln \frac{N_V}{N_D}, \quad (1.43)$$

яка еквівалентна більш простому $p_0 > N_d$. У (1.43) E_g - ширина забороненої зони напівпровідника; N_V - щільність станів у валентній зоні. Для Si та GaAs цей ефект стає помітним лише для малих бар'єрів і рівнів легування. Однак для Ge він може з'являтися в досить широкій області концентрацій [37].

Наявність неосновних носіїв в області просторового заряду змінює характер вольт-фарадної характеристики.

Вплив інжекції неосновних носіїв зарядів. Зі зростанням зовнішнього зміщення, відношення γ , яке дорівнює відношенню компоненти струму неосновних носіїв до повного струму, зростає [54]. Цей ефект стає відчутним, коли концентрація неосновних носіїв у збідненій області стає одного порядку з концентрацією легуючої домішки в приконтактній зоні. При цьому зростання інжекції одного струму починає перевищувати зростання струму неосновних носіїв і γ падає. Іншою причиною є вплив контактів. При

прямому зсуві може наставати стадія збіднення інжекції з контактів, тоді γ також починає спадати.

Залежність коефіцієнта інжекції γ від струму діода для контактів з різною висотою потенційного бар'єра показана на рисунку 1.8 [54]. Для невеликих висот потенційного бар'єру в приконтактній області криві можуть бути описані моделлю, поданою в роботах [43,53,70]. При високій щільності струму γ має максимум, а далі падає. Для напівпровідника n-типу цей максимум має значення [37]:

$$\gamma_m = \frac{\mu_p p_0}{(\mu_n + \mu_0 p_0 / N_d) N_d} . \quad (1.44)$$

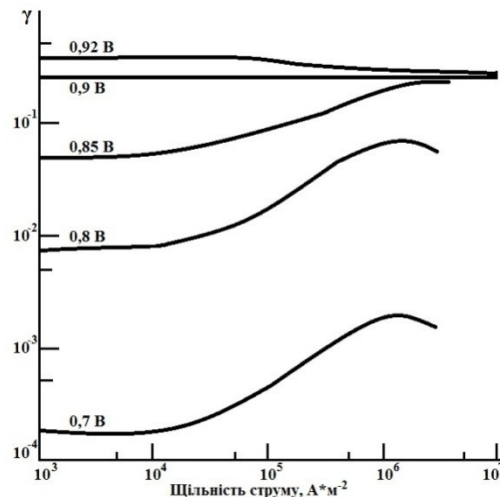


Рисунок 1.8 - Залежність коефіцієнта інжекції γ від струму діода для контактів з різною висотою потенційного бар'єра. $N_0=5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $L=5 \text{ мкм}$.

Діркова компонента струму в об'ємі менше, ніж $q\mu_p p_0 E$, тому при низькому рівні інжекції дрейфова компонента струму має вигляд $q\mu_n N_d E$. У цьому випадку [54]:

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_d} \exp V_d , \quad (1.45)$$

де n_i - власна концентрація носіїв. Відповідна залежність зображена на рисунку 1.8 [37,54] для міжелектродної відстані 5 мкм і концентрації носіїв

$5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, при цьому час життя носіїв не перевищує 5 мс. У першому наближенні роль контактів зводиться до ефективного зниження γ :

$$\gamma_s = \frac{\mu_D}{\mu_n + \mu_p}.$$

Для досить високих бар'єрів та при великому рівні легування при низькій щільності струму інжекції γ може стати більше γ_s . При подальшому збільшенні поля γ падає [54]. Явища подібного типу можуть проявлятися також у вузькозонних матеріалів при великій концентрації домішок [37].

Залежність γ від струму інжекції для зразків різної товщини досліджено у [54] для висоти бар'єру у 0,8 еВ і концентрації домішки $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (рисунок 1.9).

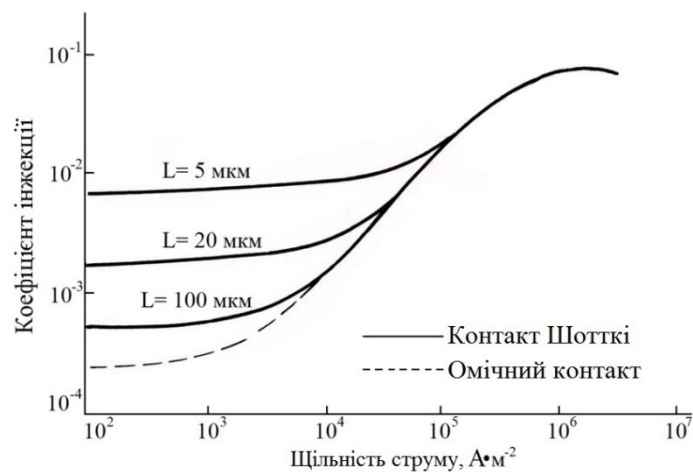


Рисунок 1.9 - Залежність коефіцієнта інжекції від щільності струму для зразків різної товщини

Встановлено, що при щільності струму вище $10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ γ досягає максимуму і практично не залежить від товщини L . Подібна залежність [71] спостерігається і для зразків з різною концентрацією легуючої домішки, при цьому зі зростанням концентрації γ падає, а максимальне значення настає при великих щільностях струму інжекції.

Аналогічна залежність характерна для зразків [54] з різною висотою потенційного бар'єра - зі зростанням ϕ величина γ дуже різко падає, хоча максимум практично не змінюється. Максимальний заряд неосновних носіїв визначається за формулою [37]: $Q = q p_0 L$, де L - товщина діода.

Чисельний розрахунок впливу неосновних носіїв заряду в режимі малого сигналу розглядався в роботі [37]. Розрахунок було проведено для різних частот і амплітуди сигналу при значенні висоти бар'єру 0,8 еВ і концентрації легуючої домішки $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Товщина діода - 100 мкм, час життя носіїв - 5 нс.

Розрахунок в роботі [66] аналогічний викладеному в роботі [60] для р-п переходу, проте відносне значення компонент імпедансу відрізняється, еквівалентний опір діода R_E тут менший, ніж у р-п переході, а в схемі заміщення, яка складається з 2-х послідовних RC-ланцюгів, з'єднаних опором розтікання R_{B1} , замість однієї з ємностей вводиться індуктивність L_{cm} , яка шунтує опір товщини напівпровідника. На високих частотах опір діода складається з геометричної ємності та повного опору розтікання.

Частотна залежність ємності діода від напруги зсуву показана на рисунку 1.10 [37] для таких самих параметрів зразка. Пунктиром виділена область, де імпеданс діода має індуктивний характер.

Видно, що ємність діода має максимум при 0,3 В, а потім падає зі зростанням напруги зсуву. Це обумовлено проникненням поля в нейтральну область у контакт. При великих зсувах власна ємність приладу визначається його геометричною ємністю. Роль неосновних носіїв зводиться до зниження максимальної ємності і зрушенню максимуму в область значних зсувів.

Низькочастотна компонента ємності має максимум, положення і величина якого залежать від висоти бар'єру діода. Зі зростанням ϕ максимум збільшується та зміщується в область великих напруг зсуву. При напругах вище 0,4-0,5 В імпеданс діода стає індуктивним.

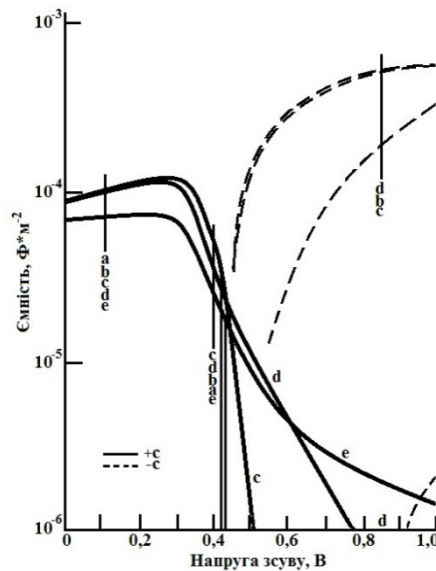


Рисунок 1.10 - Частотна залежність ємності діода від напруги зсуву. Висота бар'єру - 0,8 В, концентрація домішки – $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $L=100 \text{ мкм}$. Частоти: а) 10 кГц, б) 100 кГц, в) 1 МГц, д) 10 МГц, е) 100 МГц.

Для зразків з малою висотою бар'єру насичення провідності у функції густини робочого струму інжекції настає раніше, тоді як у зразків з $\phi > 0,8 \text{ еВ}$ насичення практично відсутнє, а провідність зростає лінійно зі зростанням струму інжекції. Ця обставина пов'язана з впливом модуляції провідності в приконтактній області діода, який обумовлено внеском неосновних носіїв в повний струм діода.

Таким чином, використовуючи звичайний розв'язок системи рівнянь для напівпровідників, можна показати, що:

1. Внесок неосновних інжекттованих носіїв в повний заряд в напівпровіднику зі збільшенням рівня інжекції прагне до деякого максимуму, величина якого визначається механізмом розсіювання електронів в напівпровіднику.

2. Урахування впливу неосновних носіїв в області просторового заряду у контакту діода Шотткі призводить до появи залежності робочих характеристик діода від струму інжекції, накопичення заряду і спотворення поля в приконтактній області.

3. У малосигнальному режимі для розрахунку схеми заміщення діодів Шотткі можна використовувати модель р-n переходу. При цьому нехтується зміна висоти потенційного бар'єру за рахунок накопичення неосновних носіїв заряду в приконтактній області. Цю обставину слід враховувати, коли концентрація неосновних носіїв стає порівнянної з концентрацією легуючої домішки в діоді.

1.5 Вплив технології виготовлення на основні параметри омічних та інжектуючих бар'єрних переходів

Розробка технології та процесу виготовлення контактів метал–напівпровідник здійснюється у декілька етапів:

1. Визначення вимог до концентрації носіїв заряду у приповерхневому шарі напівпровідника, яке повинно забезпечити мінімальне значення R_k , омічного контакту або максимальне значення висоти бар'єру Шотткі ϕ_B при заданих властивостях об'єму напівпровідника.

2. Визначення способу обробки поверхні напівпровідника, котра призведе до зміни величини та знаку вигину зон у напівпровіднику, а також параметрів проміжного шару та поверхневих електронних станів.

3. Вибір металу та способу його нанесення на напівпровідникову підкладку, які не повинні змінити вигин зон, сформований при обробці поверхні напівпровідника, або змінити параметри проміжного шару та поверхневих електронних станів.

4. Визначення температури обробки виготовленого контакту, яка змінить концентрацію носіїв заряду у приповерхневому шарі напівпровідника, параметри проміжного шару та поверхневих електронних станів.

На третьому та четвертому етапах необхідно отримати механічну міцність контакту, яка підвищується, наприклад, у випадку зменшення

напруг, що виникають при температурних обробках контакту за рахунок різних коефіцієнтів лінійного розширення напівпровідника та металу.

Таким чином, на кожному етапі змінюються фізичні параметри контактів метал-напівпровідник. Для омічного контакту - це значення R_k . Вираз для опору R_k , якщо він визначається тільки струмом основних носіїв заряду [28]:

$$R_k = (4kT/e) \cdot [e \cdot n_0(\rho_0) \cdot v_{n,p} \cdot B]^{-1}, \quad (1.46)$$

де $n_0(\rho_0)$, $v_{n,p}$ - концентрація та середня швидкість електронів (дірок) у приповерхневому шарі напівпровідника, B - коефіцієнт, що має різноманітні значення в залежності від моделі омічного контакту [45]. Для інжектуєчого бар'єрного переходу – це висота бар'єру Шотткі ϕ_B [37].

1.5.1 Вибір контактних матеріалів для виготовлення омічних та інжектуєчих бар'єрних переходів до арсеніду галію

Для отримання контактів до напівпровідникових матеріалів методом вакуумного випаровування необхідно враховувати реакції на межі тонкі плівки - підкладка, які впливають на стабільність характеристик елементів та їх відтворюваність. Тому вибір контактних матеріалів для всіх плівкових елементів повинен бути обґрунтований. Метал або сплав, який використовують для отримання контактів повинен відповідати таким вимогам:

- низька температура випаровування, яка дозволить проводити випаровування з вольфрамових випарників, не вдаючись до електронно-променевого нагріву. Атоми, що мають низьку температуру випаровування менше розігрівають поверхню підкладки при їх конденсації, отже зменшується вірогідність з'єднання матеріалу плівка-випарник;

- значна енергія зв'язку між осадженим матеріалом і підкладкою, щоб при осадженні на гарячу підкладку не відбувалося реєвипаровування атомів;
- з'єднання на межі розділу повинні бути стійкими до кліматичного та механічного впливів та мати область з прийнятними електрофізичними характеристиками;
- поверхня металевої плівки при максимальній робочій температурі приладу не повинна окислюватися або окислюватися на невелику глибину та утворювати суцільну плівку, яка буде виконувати функції пасивуючої плівки;
- механічна міцність матеріалу плівки.

Для виготовлення омичних контактів до GaAs n-типу використовують системи: In [23], Ag-Sn [75], Ag-Ni [76], Au-Ge [31], Pd-Ge [72], Ag-Ge-In[74,75,94], Au:Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au:Ge [80], Au-Ge-Ni-Au [20], Ge/Au/Ni/Ti/Au [12], Ge/Cu [12], Pd/Ge/Al [12], Ti/Pd/Ag [8], Au-Ge-TiB₂-Au [25]. Для формування омичних контактів до GaAs n-типу у виробництві традиційно використовують сплави на основі таких металів, як Au, Pt и Pd, наприклад, Au-Ge-Ni [80], Pd-Ge-Mo-Cu [19], Au-Pt-Ti[23], питомий перехідний опір яких є достатньо низьким (10^{-5} Ом·см²). Але собівартість цих виробів є достатньо високою, через високу вартість дорогоцінних металів. Широке застосування срібла стримується його великим природним дефіцитом. Вимоги до матеріалу контакту: значна тепло- та електропровідність, невеликий коефіцієнт дифузії, збереження типу провідності GaAs, невелика температура плавлення (котра не перевищує граничну робочу температуру приладу), добра змочуваність поверхні GaAs, механічна міцність контакту.

Для створення омичного неінжектуєчого бар'єрного переходу до GaAs було обрано сплав срібло-германій-індій, що складається з 75% Ag (основний матеріал), 20% Ge (легуюча добавка), 5% In (покращує змочуваність, зменшує поверхневе натягнення металу). Сплав виготовлено у вакуумі у кварцовій ампулі з витримкою при 1273 К впродовж 30 хвилин.

На величину потенційного бар'єру інжектуючого бар'єрного переходу до арсеніду галію певний вплив має вибір контактної пари. В даний час для створення інжектуючого бар'єрного переходу метал-напівпровідник до GaAs застосовуються Au [3,7,11,95], Ag [11,18,63,141,96,98-100], Pd [11], V [102], W [101], Al [57,64], Cu [97], Fe [97]. Найбільш придатні для використання в НВЧ діапазоні бар'єри переходу з Ag та Au. У порівнянні з золотом Ag має [38] менший коефіцієнт дифузії в арсенід галію, що важливо для зменшення товщини перехідного шару, гарну теплопровідність, яка збільшує рівень потужності інжектуючого контакту, добре змочує поверхню GaAs, що забезпечує хорошу механічну міцність контакту.

Таким чином, за результатами попередніх досліджень [11,57,63,96,98-100] в якості бар'єрного матеріалу обрано срібло високої чистоти. Срібло утворює з GaAs сполуки, які не змінюються в робочому діапазоні температур [37,38]. У срібла та арсеніду галію близькі значення ТКР. Срібло індиферентно до кислот і лугів, а також більшості їдких газів [38].

1.5.2 Аналіз існуючих технологій виготовлення багатокомпонентних омічних переходів на основі срібла до арсеніду галію

Основні проблеми омічних контактів до GaAs: відсутність рівномірного змочування металу, шорсткість поверхні, сегрегація металу у приконтактну область, наявність безліч фаз метал-напівпровідник, ерозія поверхні контакту.

Відомі [75,77,94,103-104] різні технології формування омічних контактів до напівпровідникових з'єднань A_3B_5 . Технологія формування багатошарового омічного контакту [104] включає послідовне нанесення на поверхню напівпровідника шару нікелю, шару індію і шару германію з подальшим відпалом при температурі 573...873 К продовж часу від декількох секунд до декількох хвилин. Перед відпалом на поверхню вказаних шарів

можуть бути нанесені шари ніобію або його з'єднання і шар, наприклад, золота. В результаті реалізації цього способу в приконтактній області утворюється дуже неоднорідний за товщиною та складом прошарок твердого розчину з'єднання InGaAs, що значно погіршує термічну стабільність контакту. Крім того, даний спосіб не вирішує проблему неоднорідного протравлення межі розділу контакт-напівпровідник при відпалі.

У [103] технологія формування багат шарового омічного контакту до напівпровідникових з'єднань GaAs включає послідовне нанесення на поверхню напівпровідника плівок нікелю, металу, вибраного з групи Au, Pd, Pt або Ag, і плівки германію з подальшим відпалом в атмосфері азоту і водню при температурах 673...1023 К протягом часу від декількох секунд до декількох хвилин. Цей спосіб не дозволяє запобігти ерозії поверхні контакту і неконтрольованому протравленню межі розділу метал-напівпровідник при відпалі контакту.

У [77] у способі виготовлення методом термічного випаровування омічних контактів Au:Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au:Ge GaAs, де 90% Au або 90% Ag, 5% Ge, 5% In або 5% Ni за вагою, було досліджено вплив режимів термообробки у надвисокому вакуумі на морфологію поверхні нанесеної плівки та питомий контактний опір. У якості підкладки використовувався епітаксійний $n\text{-n}^+\text{GaAs}$ (100), $d_{\text{еш}}=2$ мкм, $N_D=2\cdot 10^{16}$ см⁻³. Недолік – при температурі 640 °С починається мікросегрегація та виникнення явища агломерації при подальшому зростанні температури.

У [75] описано технологію отримання омічних контактів до GaAs n-типу провідності зі сплаву Ag-Ge-In, в якому в якості контактного матеріалу використовують сплав срібло-германій-індій, що містить за вагою 75% Ag, 20% Ge, 5% In. Пластини епітаксійного n-GaAs ($N_D=2\cdot 10^{14}$ см⁻³) піддають хімічному поліруванню в суміші метилового спирту і бром (6:1) (за об'ємом). При вакуумному напиленні контактного матеріалу на установці УВН-2 нагрів зразків відбувається тільки за рахунок променистої енергії випарника, температура контролюється за допомогою хромель-алюмелевої

термопари і досягає 423...453 К. Після напилення контакти відпалюють в вакуумній трубчастій печі при температурі 923 К протягом 10 хвилин. Питомий перехідний опір $\rho_k = (1,5..2) \cdot 10^{-2} \dots (8...9) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Недоліками даного способу є низька термостабільність електричних параметрів контакту, недостатньо низький контактний опір.

У [94] запропоновано технологію отримання омічних контактів до GaAs n-типу провідності зі сплаву Ag-Ge-In (75% Ag, 20% Ge, 5% In за вагою відповідно) до епітаксійного шару GaAs з концентрацією $N_D = 6 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Після хімічної обробки у суміші $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1), у метиловому спирті відпалюють пластину при 823 К протягом 1-2 хвилин при залишковому тиску 10^{-5} Торр. Напилюють сплав при температурі підкладки 473 К, відпалюють у вакуумі $1,2 \cdot 10^{-5}$ Торр при 873 К 1 хвилину. Питомий опір складає $\rho_k = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Недоліки: недостатньо низький питомий контактний опір та порушення морфології поверхні плівки.

На підставі вищевикладеного видно, що основні недоліки відомих технологій це недостатньо низький контактний опір, низька термостабільність електричних параметрів контактів, неможливість запобігти ерозії поверхні контакту і неконтрольоване протравлення межі розділу метал-напівпровідник при відпалі контакту.

1.5.3 Аналіз існуючих технологій виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію

В даний час дослідження та розробку контактів ведуть в напрямках пошуку нових композицій метал-арсенід галію та розробки технологічних режимів, які змогли б забезпечити відтворюваність параметрів НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі (БШ).

Підбір технологічних режимів [11,18,141,95,105,106] створення проміжних фаз на межі метал-напівпровідник знижує вплив поверхневих станів напівпровідника на роботу приладів з бар'єрами Шотткі.

У більшості робіт [63,70,98,99,101,107-109], виконаних у цих напрямках, головною метою є дослідження електрофізичних властивостей контактів (наприклад, висоти потенційного бар'єру, коефіцієнта інжекції), вивчення питань їх формування. У ряді робіт [18,56,58] властивості контактів значною мірою визначаються станом структури у зоні контакту. Тому знання структурних особливостей перехідних шарів контактів дозволить цілеспрямовано шукати способи покращення їх електрофізичних параметрів та характеристик.

Відома технологія [110] формування бар'єрного переходу Ag до напівпровідникових з'єднань A_3B_5 , у якому срібло наноситься на напівпровідникову підкладку при температурі 393 К іонно-плазмовим напиленням у вакуумі 10^{-4} Торр. Відпал структури проводили при 623 К. Висота потенційного бар'єру Ag/InP складала 0,78-0,84 В. Недоліком даного способу є недостатня термостабільність контакту та низька відтворюваність результатів.

Відома технологія [111] формування бар'єрного переходу Ag/GaAs. Срібло наносять на зколоту у надвисокому вакуумі поверхню GaAs (100). Відпал в атмосфері азоту при 678 К продовж 10 хвилин. Висота потенційного бар'єру - 0,9 В. Недоліком даного способу є недостатня термостабільність контакту та низька відтворюваність результатів.

У [11] запропоновано технологію отримання бар'єрного переходу Ag/n-GaAs в якій пластини епітаксійного n-GaAs (100) з $N_D=3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ піддають поліровці в органічних розчинах (ацетоні, потім у метиловому спирті). Фінішне очищення підкладки проводять у розчині HCl:H₂O (1:1) продовж 60 секунд для знищення природного окисного шару на поверхні. Напилення срібла на арсенідогалієву підкладку n-типу провідності проводять методом вакуумного випаровування, після чого відпалюють в атмосфері аргону при

температурі 703 К протягом 5 хвилин. Вольт-амперні характеристики виготовленого бар'єрного переходу вимірюють при кімнатній температурі. Висота потенційного бар'єру Ag/n-GaAs складала $\phi_{\text{Вн}}=0,82$ В, коефіцієнт неідеальності $\eta=1,12$.

Відома технологія [141] отримання бар'єрних переходів Ag/n-GaAs, що включає обробку у $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$, напилення на підкладку з $N_D=3\cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$ при 373 К, відпал при 823 К у вакуумі $1,2\cdot 10^{-5}$ Торр. Висота потенційного бар'єру Ag/n-GaAs складала $\phi_{\text{Вн}}=0,9\ldots 0,95$ В.

На підставі вищевикладеного видно, що бар'єрні переходи Ag/n-GaAs мають за недолік недостатню висоту потенційного бар'єру.

1.6. Постановка та обґрунтування завдання дослідження

До теперішнього часу встановлено [32,72,73,81,86,93,97], що фізична модель реального контакту метал-напівпровідник (КМН) є складнішою в порівнянні з моделями ідеального КМН. Реальні епітаксійні плівки мають нерівномірний розподіл домішок, що виникає в процесі зростання плівки. Обробка поверхні напівпровідника для отримання мінімального мікрорельєфу призводить до непланарності межі розділу метал-напівпровідник. При обробці поверхні напівпровідників у вакуумі за допомогою термічного відпалу відбуваються випаровування фізично, хімічно адсорбованих газів з поверхні, газів і легуючих домішок з приповерхневого шару, а також фазові перетворення в твердій фазі та термохімічні реакції [32,72,73].

Отримати близьки до ідеальних ВАХ можливо ретельним очищенням поверхні та підбором оптимального температурного режиму відпалу структури метал-напівпровідник, що впливає на проміжний шар контакту.

Тому у дисертаційній роботі поставлені наступні завдання:

1. Провести комплекс теоретичних й експериментальних досліджень для уточнення і поглиблення уявлень про фізичну природу контактних явищ в омічних та інжектуючих бар'єрних переходах, проаналізувати відповідні фізичні моделі та провести розрахунок основних параметрів, дослідити вплив різних чинників на якість бар'єрних переходів до арсеніду галію.
2. Визначити контактні системи, найбільш перспективні з погляду можливості отримання омічних контактів з питомим перехідним опором не більше 10^{-4} Ом·см² та інжектуючих бар'єрних переходів з висотою потенційного бар'єру більше 0,95 В до арсеніду галію n- типу провідності.
3. Для покращення параметрів омічних та інжектуючих бар'єрних переходів розробити ефективні методи пасивації поверхні GaAs.
4. Дослідити та оптимізувати методи та режими формування омічних та інжектуючих бар'єрних переходів до GaAs.
5. Дослідити вплив методу визначення параметрів бар'єрного переходу на їх точність.
6. Дослідити можливість створення нових типів НВЧ-приладів з бар'єрами Шотткі.

Висновки до розділу 1

1. Дістала подальшого розвитку модель контакту метал-напівпровідник, яка описує процеси перенесення між електронами металу, граничними станами та вільними носіями напівпровідника, дозволяє вивчати реальну структуру метал-напівпровідник з урахуванням впливу ефектів швидких та повільних станів та вплив проміжного окисного шару у цілому і може врахувати будь який фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

2. На основі проведеного аналізу основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції у простих діодних структурах $R-p^+-n(p)-n^+-R$, які мають два активні інжектуючі бар'єрні переходи та омічні контакти до низькоомних областей, показано, що ці математичні викладки можуть бути використані для розрахунку і більш складних структур.

3. Урахування впливу неосновних носіїв в області просторового заряду у контакту діода Шотткі призводить до появи залежності робочих характеристик діода від струму інжекції, накопичення заряду і спотворення поля в приконтактній області.

4. Реальні характеристики і параметри омічних та інжектуючих бар'єрних переходів срібло-арсенід галію залежать від технології їх виготовлення і потребують розробки нових способів створення контактів з поліпшеними параметрами.

Результати даного розділу опубліковано у роботах [22,53,54,58,61-62,108].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження використовувався $n\text{-}n^+\text{GaAs}(111)\text{В}$ епітаксійний монокристалічний, товщина епітаксійного шару $d_{\text{еш}}=2$ мкм, концентрація донорів в епітаксійному шарі $N_D=(1\ldots 3)\cdot 10^{16}$ см⁻³, концентрація донорів у підкладці $n_{\text{підкл}}=10^{18}$ см⁻³, рухливість носіїв $\mu \geq 5000\ldots 7000$ см²/(В·с) при 300 К.

Епітаксійні структури арсеніду галію, використані у експериментах, отримані газотранспортним хлоридним методом на напівізолюючих підкладках, легованих хромом.

Методи нанесення металів на напівпровідники за ступенем впливу на властивості поверхні напівпровідника можна розділити на дві групи [81-83]: методи, що не змінюють властивості поверхні напівпровідника (наприклад, термічне напилення металу у вакуумі при низькій температурі напівпровідника) та методи, що змінюють властивості поверхні напівпровідника (наприклад, катодне розпилення металу, хімічне та електрохімічне осадження). Хімічне та електрохімічне осадження не використовують для матеріалів високої чистоти через побічні процеси та сторонні домішки в електролітах. Катодне розпилення проводиться у атмосфері газу, що може приводити до забруднення напилених плівок контактного матеріалу.

Контакти виготовляли методом вакуумного випаровування на установці ВУП-4 (рисунок 2.1). Високий вакуум в процесі термічного випаровування дозволяє отримати металеві плівки без забруднення. Цей метод [90] дозволяє у широких межах регулювати швидкість випаровування та температуру підкладки. Товщина плівки контакту склала 0,5 мкм.



Рисунок 2.1 – Установка ВУП-4 кафедри мікроелектронних інформаційних систем Запорізької державної інженерної академії

Для вимірювання вольт-амперних характеристик бар'єрного переходу метал-напівпровідник використовувалась схема (рисунок 2.2), розроблена на основі чотирьохзондового методу вимірювань [36,67,68,115].

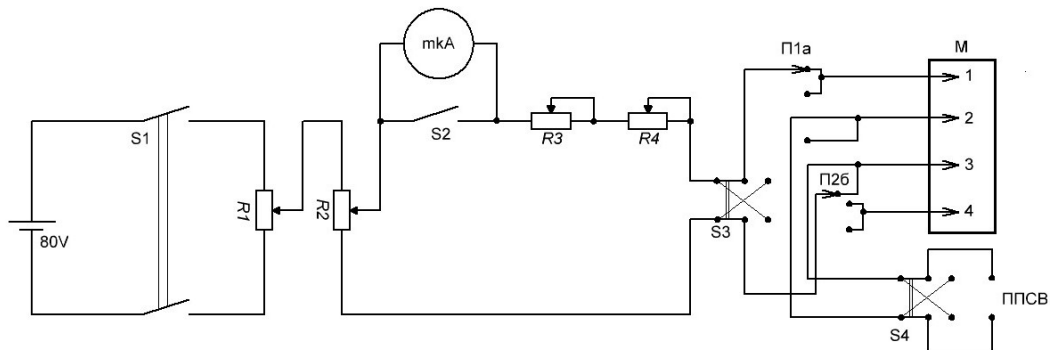


Рисунок 2.2 - Принципова електрична схема пристрою для вимірювання вольт-амперної характеристики контактів метал-напівпровідник

Живлення схеми здійснюється від батареї постійного струму. На вході використаний подвійний дільник напруги на опорах R1 та R2. Вимірювання величини струму проводилося мікроамперметром М-95. Грубе і плавне регулювання струму здійснюється за допомогою магазинів опору R3 та R4.

У схемі передбачено зміну напрямку струму крізь зразок за допомогою перемикача S3, також можливість вибірково пропускати струм крізь зонди

маніпулятора М. Падіння напруги на зразку вимірюється компенсаційним методом за допомогою компенсаційного мосту класу 0,015 типу Р-307 ГОСТ 9245-79. Перемикач S4 дозволяє змінити полярність напруги, що подається на вхід потенціометра.

За допомогою опорів встановлюється необхідний струм, який проходить крізь крайні зонди (1 та 4). З другого й третього зондів вимірюється напруга. Змінюючи струм у певному інтервалі та вимірюючи відповідні значення напруги, будуємо ВАХ досліджуваного контакту.

2.1 Основні параметри омичних контактів та методи їх визначення

Основні параметри, що характеризують якість омичних контактів [38]: лінійна та симетрична вольт-амперна характеристика (ВАХ); контактний опір, який повинен бути мінімальним; коефіцієнт інжекції.

Визначення величини питомого перехідного опору контактів ρ_k , як правило, є необхідним для оцінки якості омичних контактів. Існує цілий ряд методів [114-123], які іноді поділяють за способом визначення перехідного опору контактів. Наприклад, при визначенні питомого перехідного опору контактів [123] непрямым (розрахунковим) шляхом, так званими беззондовими методами, важко повністю врахувати усі фактори (стан межі зрощення контактуємих матеріалів, розподіл струму у контактах різної геометричної форми, технологічні режими формування контактів та ін.), які впливають на шукану величину. Безелектродні методи [123] вимірювання питомого опору вельми складні і не досить надійні. При вимірюванні перехідного опору контактів прямим способом за допомогою зондових методів [123] виникають похибки, пов'язані з малим значенням величини опору. На точність процесу вимірювання впливають якість підготовки поверхні, наявність епітаксійного шару, структура та форма досліджуваного

зразку, вимірювальна апаратура та зовнішні фактори, наприклад, оточуюче середовище.

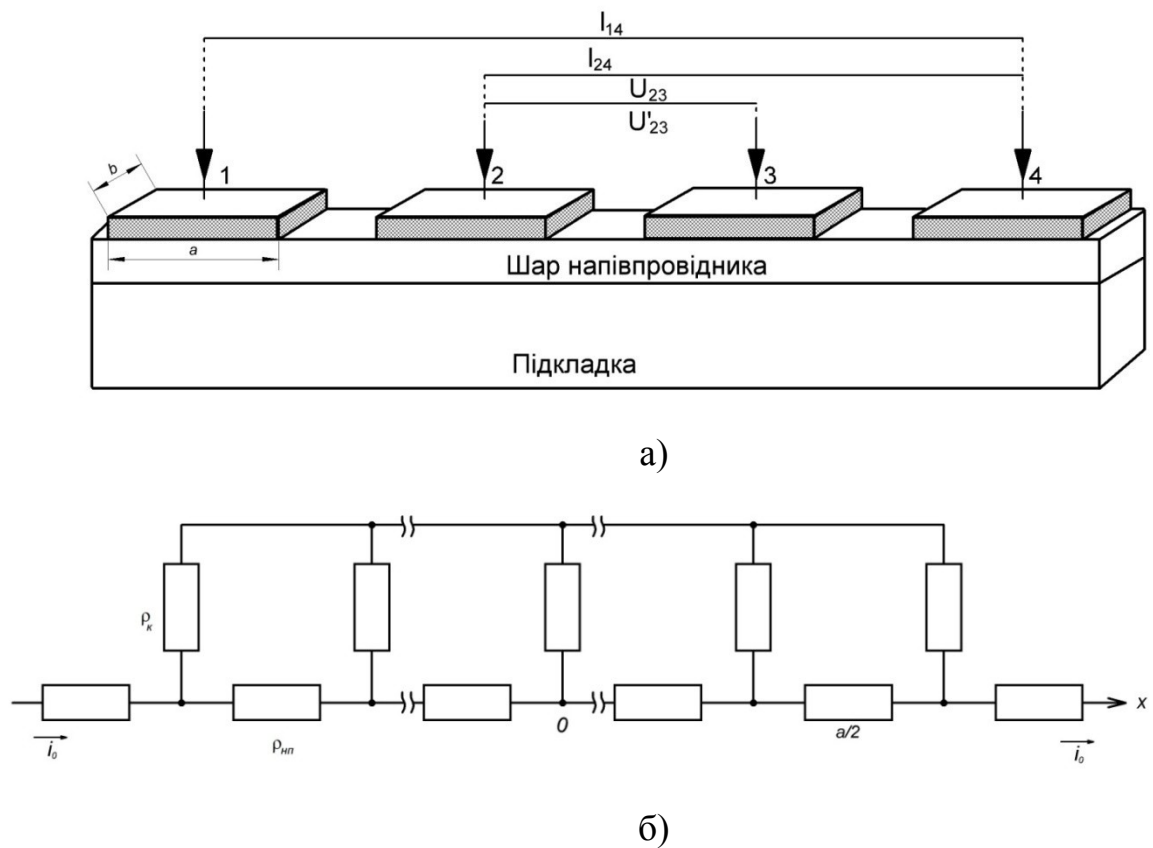
Величина ρ_k є фізичною характеристикою невикривлюваних контактів, яка не залежить від їх площі та геометрії. У зв'язку з розвитком планарної та планарно-епітаксійної технологій інтегральних схем і деяких типів напівпровідникових приладів стає актуальним вимірювання ρ_k контактів, що знаходяться на одній стороні напівпровідникової пластини [125]. Існують різні методи вимірювання перехідного опору омичних контактів до тонких шарів напівпровідника [113,114,123].

Серед зондових методів [123] найбільш поширений чотирьохзондовий метод, який визнано арбітражним. Для визначення питомого електричного опору напівпровідникової пластини використовують чотирьохзондовий пристрій з лінійним розташуванням зондів. Постійний струм пропускають крізь зразок між зовнішніми зондами і вимірюють різницю потенціалів, що виникає між внутрішніми зондами. Питомий електричний опір обчислюється з вимірюваних значень різниці потенціалів і струму з застосуванням поправочних коефіцієнтів на геометрію зразка. У системі стандартів ASTM [112] вимоги до обладнання та методик вимірювання та розрахунку ρ чотирьохзондовим методом викладені в 5 стандартах.

2.1.1 Методики вимірювання та розрахунку питомого перехідного опору омичного бар'єрного переходу

Значення питомого перехідного опору омичного бар'єрного переходу розраховувалось за методикою, запропонованою у [113,114,134]. Тестовий зразок представляв собою структуру з контактами у формі паралельних прямокутників на поверхні тонкого епітаксійного шару, зрощеного на високолегованій напівпровідниковій підкладці (рисунк 2.3,а). Вимірювання опору контакту проводилося компенсаційним методом [114], вимірювання

різниці потенціалів між контактами 2 і 3 та падіння напруги на калібрувальному опорі, який використовують для точного встановлення однакової величини сталого струму. Похибка вимірювань залежить від чутливості вимірювальних приладів та компенсаційних мостів. При проведенні вимірювань використовувався компенсаційний міст класу 0,015 типу Р-307 ГОСТ 9245- 79. Основна похибка вимірів при цьому, виражена в % від номінального значення вимірюваного опору при температурі $+293 \pm 2$ К і відносній вологості повітря 80%, не перевищувала значень: а) $\pm 0,1\%$ у межах $10^{-3} - 10^{-2}$ Ом, б) $\pm 0,05\%$ в межах $10^{-2} - 10^{-8}$ Ом.



а – поперечний переріз тестової контактної структури; б – еквівалентна схема контакту при протіканні струму під контактом

Рисунок 2.3 – Схема вимірювання питомого опору

Розрахунок питомого перехідного опору омичного контакту проводився методом еквівалентних схем [113,114] (рисунок 2.3,б). Умова використання

методу: тонкий шар напівпровідника з малим питомим опором, на якому нанесено контакт, поверхневий опір металевого контакту менший за поверхневий опір напівпровідника, ширина контакту набагато більше товщини епітаксійного шару.

На рисунку 2.3 області контакту позначенні 1...4. Крізь крайні контакти 1 та 4 пропускається постійний струм I та вимірюється падіння напруги $U_{2,3}$ у шарі напівпровідника між контактами 2 та 3. Той самий струм подається крізь контакти 2 та 4 та вимірюється напруга $U'_{2,3}$ між контактами 2 та 3. Різниця інтерпретується, як падіння напруги на переході контакту 2 - $\Delta R_K \cdot I$ [114].

$$U'_{2,3} - U_{2,3} = \Delta U_2 = \Delta R_K \cdot I$$

Потім визначається питомий перехідний опір:

$$\Delta \rho_K = \Delta R_K \cdot S_K = \Delta R_K \cdot a \cdot b, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2,$$

де a , b - ширина і довжина контакту, см.

Теоретичний аналіз, зроблений у [113,114,134], визначив, що виміряна величина ΔR_K не дорівнює справжній, тому що при вимірюванні $U_{2,3}$ контакт шунтує шар напівпровідника під ним, а при вимірюванні $U'_{2,3}$ його загальний опір залежить від перехідного опору контакту та від опору розтікання під ним у шарі напівпровідника.

Величина загального опору контактів визначалась по формулі [113,134].

$$R_k = \frac{\rho_{\text{нп}} a}{b} \left[\frac{\text{cth } aK}{aK} \right] \quad (2.1)$$

$$\rho_k = \frac{R_k b}{K \text{ ch } aK} \quad (2.2)$$

де R_k – повний опір контакту, ρ_k - питомий перехідний опір контакту, a - ширина контакту ($a=0,15$ см), b - довжина контакту ($b=0,5$ см), $\rho_{\text{нп}}$ - поверхневий опір напівпровідника ($\rho_{\text{нп}}=2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см). Значення K , що відповідають значенням R_k , знаходяться з графічного розв'язку рівняння $y_1=cKa$, $y_2=\text{cth } Ka$ (витікаючи з рівняння (2.2)), де $c=R_k \cdot b/(\rho_{\text{нп}} \cdot a)$. результат отримано за допомогою програми Wise Calculator (рисунок 2.4).

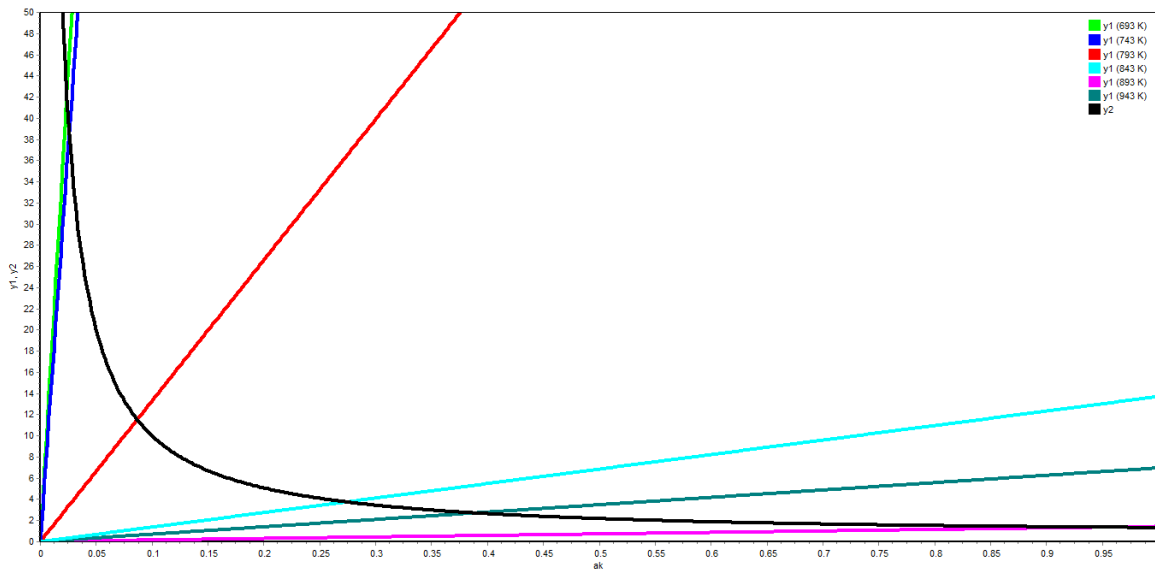


Рисунок 2.4 - Графічний розв'язок рівняння $y_1=cKa$, та $y_2=\text{cth } Ka$ для знаходження параметру K при різних температурах відпалу контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs

Таблиця 2.1

Результати розрахунків питомого перехідного опору омічних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs

R_k , Ом	aK	K	$\rho_{\text{розр}}$, Ом·см ²	$\rho_{\text{нав}}$, Ом·см ²	$T_{\text{відп}}$, К
1,07	0,025	0,167	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	693
0,89	0,027	0,182	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$6,68 \cdot 10^{-2}$	743
0,08	0,088	0,585	$5,99 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	793
0,008	0,271	1,807	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	843
0,00085	0,916	6,1067	$5,06 \cdot 10^{-5}$	$6,375 \cdot 10^{-5}$	893
0,004	0,388	2,587	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	943
$\rho_{\text{нп}}=2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, $a=0,15$ см, $b=0,5$ см					

У [113,134] визначено, що значення $K^2 = \rho_{\text{нп}} / \rho_{\text{к}}$. Межі виміру чисельних значень K обрані з умови, що $\rho_{\text{к}} / \rho_{\text{нп}}$ менше одного порядку ($K=0,1 \div 10$), що відповідає загальним вимогам, які пред'являються до контактів. Очевидно, що у разі, коли величина опору контакту метал-напівпровідник $R_{\text{к}} > \rho_{\text{нп}}$, то $\rho_{\text{к нав}} > \rho_{\text{нп}}$ спостерігається явище розтікання струмів, котрі проходять крізь контакт, в приконтактній області. При оптимальному режимі при умові $\rho_{\text{к}} \leq \rho_{\text{нп}}$ отримуємо $\rho_{\text{к}}$ контакту. Звідси відмінність значень виміряного і приведенного до одиниці площі опору контакту $\rho_{\text{к}}$ від $\rho_{\text{к розр}}$.

Математична обробка результатів досліджень питомого перехідного опору омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs та похибок вимірювання у пакеті програм Excel наведена у додатку А. Довірчий інтервал склав для $P(95\%) = 4,98 \cdot 10^{-5} \div 4,99 \cdot 10^{-5}$, для $P(99\%) = 4,98 \cdot 10^{-5} \div 4,99 \cdot 10^{-5}$ для омичних контактів, створених при оптимальному режимі.

2.1.2 Методика дослідження інжекційних властивостей омичних бар'єрних переходів

Одними з основних параметрів, які характеризують інжекційні властивості контактів метал-напівпровідник (омичних контактів), є рівень інжекції γ [124-126]. Відомий ряд методик [126] для визначення цього параметру, які підрозділяються за родом використовуваного при вимірюваннях струму: на постійному, змінному або імпульсному струмах.

З методів вимірювання на постійному струмі цікавим є метод вимірювання інжекції неосновних носіїв заряду γ , представлений в [124]. Метод простий, проте володіє недостатньо високою точністю. Існує кілька методик, що дозволяють вимірювати швидкість рекомбінації θ без проходження струму через перехід [126]. Загальним недоліком методів дослідження інжекційних властивостей непрямої контактів на

постійному струмі [125] є складність розрахунку шуканих величин за громіздкими розрахунковими формулами.

Методи визначення θ і γ на змінному струмі [125] засновані на вимірюванні таких рекомбінаційно-чутливих параметрів діодів як обумовлена низькою частотою дифузійна ємність та прямий опір, які більшою чи меншою мірою визначаються швидкістю рекомбінації в контакті. Загальним недоліком методів дослідження інжекційних властивостей невикривляючих контактів як на постійному, так і на змінному струмі є неможливість проведення вимірювань при порівняно великій щільності струму [124].

Імпульсні методи [124-126] дозволяють проводити вимірювання при високих рівнях інжекції. Ці методи засновані на аналізі перехідних процесів в діоді, що виникають при перемиканні діода з прямого напрямку в зворотний або нейтральний [126].

Крім величини рівня інжекції та його залежності від прямого струму, методом перемикання діода з прямого напрямку в зворотний (методом «полички») [126] можна визначити швидкість рекомбінації неосновних носіїв на омичному контакті. За знайденою величиною θ знаходять уточнене значення рівня інжекції для діодів з тонкою або з товстою базою.

Недоліком методу «полички» є велика похибка вимірювання тривалості полички при часах життя, порівнянних з тривалістю заднього фронту імпульсу. Більшість викладених методів приблизно рівноцінні, хоча за точністю визначення шуканої величини деяку перевагу слід віддати імпульсним методам, головним чином зважаючи на короткочасний вплив електричного струму на контакт.

Одним з недоліків розглянутих методик є складність розрахунку шуканих величин за громіздкими розрахунковими формулами.

Перевага імпульсних методів пов'язана з короткочасною дією на контакт електричного струму, унаслідок чого виключаються методичні помилки,

пов'язані з неконтрольованим нагрівом зразка, зміною початкової концентрації носіїв та їх часу життя, появою різних е.р.с.

Для дослідження інжекційних властивостей непрямої омичних бар'єрних переходів (омичних контактів) була використана мостова схема. Зразок встановлювався в одне з плечей моста (рисунк 2.5).

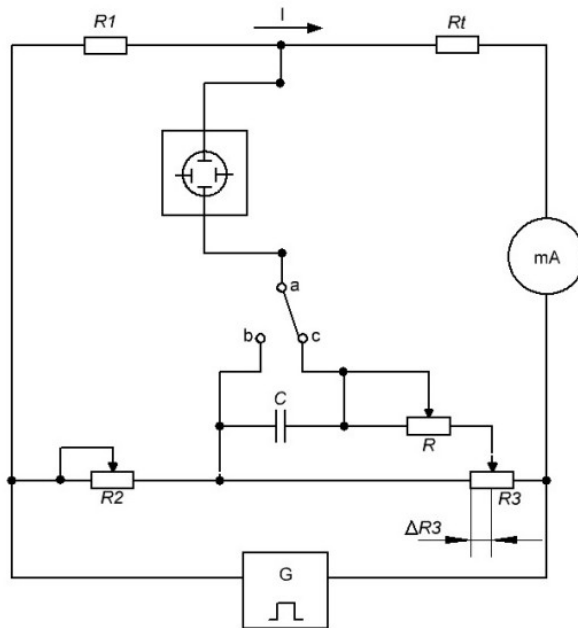


Рисунок 2.5 - Мостова схема для дослідження інжекційних властивостей омичних бар'єрних переходів [124]

Опір зразка R_t залежить від кількості інжекттованих носіїв з контактів, які визначаються амплітудою та тривалістю імпульсів струму. Розрахункові співвідношення підтвердили залежність інжекційних параметрів омичних контактів від електрофізичних властивостей початкового матеріалу й особливостей виготовлення. При малих амплітудах міст між точками а та б балансується резистором R_2 . При великих амплітудах за рахунок інжекції з контактів R_t знижується, і сигнал розбалансування мосту фіксується осцилографом. Аналіз залежностей величини $\Delta U(t)$ дає можливість визначити час життя неосновних носіїв τ . Однак такий спосіб досить складний, та його точність в цілому залежить від лінійності підсилювача.

Щоб позбавитись цього недоліку, до схеми включено ланцюг з резистора R та конденсатора C , причому $R \gg R_3$, так само як $R_1 \gg R_t$.

Тоді балансування мосту між точками a та c виконується резисторами R та R_3 таким чином, щоб баланс виконувався протягом усієї тривалості імпульсів. На екрані осцилографа буде спостерігатися горизонтальна лінія, яка буде знаходитись на нульовому рівні.

Величина τ знаходиться з виразу $\tau = RC$. Величина γ знаходиться наступним чином [124]:

$$\gamma = \frac{\Delta R_3}{R_3} \frac{qV(bn_n + p_n)}{(b+1)I\tau} = \frac{\Delta R_3}{R_3} \frac{V}{(b+1)I\tau\rho_{\text{нп}}\mu_p},$$

де V – об'єм напівпровідникового зразка, $\rho_{\text{нп}}$ - питомий опір напівпровідника.

2.2 Основні параметри інжектуючих бар'єрних переходів та методи їх визначення

Основні характеристики та параметри, що характеризують якісні бар'єри Шотткі: вольт-амперна характеристика, висота бар'єру Шотткі ϕ_B , фактор неідеальності η , послідовний опір R_s , рівень інжекції γ [34,37,31].

Відомо кілька **методів визначення висоти потенційного бар'єру** [31,36]. Одним з них є метод побудови кривих Фаулера, заснований на оптичних властивостях діодів Шотткі. Висота бар'єру може бути визначена методом вольт-фарадних характеристик (метод ВФХ), тобто за вимірюванням дифузійної ємності зі збідненого шару, як функція від прикладеної зворотної напруги зсуву [37]. Для визначення контактного потенціалу в системі метал-напівпровідник можна використовувати спектральний метод [37]. Основа методу - принцип збудження електронно-діркових пар у напівпровідниковій підкладці поблизу металевого контакту. Досліджують і порівнюють спектри відображення червоного

випромінювання від окремих областей діода та безпосередньо від ділянок контактування металу та напівпровідника.

У дисертаційній роботі висота бар'єру визначалась за допомогою вимірювання струму насичення I_s (при прямому ввімкненні) (метод вольт-амперних характеристик) [33,37]. Методика та результати розрахунків наведені у розділі 4.

Математична обробка результатів досліджень висоти бар'єрного переходу $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ та похибок вимірювання у пакеті програм Excel наведена у додатку Б. Довірчий інтервал для $P(95\%)=9,38 \cdot 10^{-1} \div 9,48 \cdot 10^{-1}$, для $P(99\%)=9,36 \cdot 10^{-1} \div 9,50 \cdot 10^{-1}$.

Методика розрахунку коефіцієнта інжекції інжектуючих бар'єрних переходів. При низькому рівні інжекції перенесення заряду в діодах Шотткі здійснюється головним чином основними носіями [30]. Але при достатньо великих прямих зміщеннях коефіцієнт інжекції неосновних носіїв γ (тобто відношення струму неосновних носіїв до повного струму) зростає зі зростанням струму. Припускається, що зростає дрейфова компонента струму, яка переважає дифузійну. Методики визначення інжекційних параметрів бар'єрів Шотткі запропоновані Родеріком [46,47] та Зі [33,37]. Результати розрахунків коефіцієнта інжекції γ бар'єрних переходів $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ наведені у розділі 4.

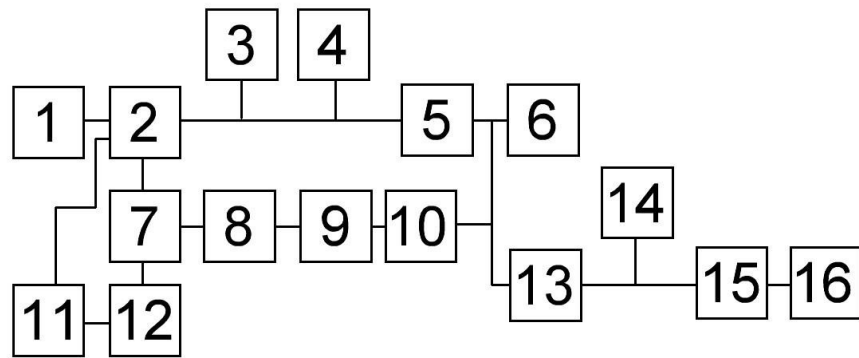
2.3 Методика вимірювання параметрів НВЧ приладу

Енергія надвисоких частот широко застосовується в різноманітних галузях промисловості, зокрема при контролі параметрів НВЧ –приладів.

Потребується вимірювання або контролювання енергетичних параметрів сигналів з використанням різних методів, реалізованих у вимірювачах потужності НВЧ – сигналів.

Для вимірювання параметрів та характеристик транзисторів звичайно використовують такі пристрої, як ПНХТ-1 та його аналогі Л2-56, Л2-56А або TR-4805, що мають блоки випробування ЛПС. Однак визначення параметрів та характеристик ЛПС проводиться у низькочастотному діапазоні.

Тому для вимірювання параметрів МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі типу транзистору біжучої хвилі (ТБХ), що працюють у НВЧ діапазоні, розроблено схему (рисунок 2.6) у відповідності з міждержавним стандартом «Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы СВЧ. Усилители маломощные. Параметры и характеристики. Методы измерений» - ГОСТ 29180-91, діючий на Україні до 01.01.2019 р.



1 - осцилограф, 2 – детектор, 3 – аналізатор спектру, 4 – генератор імпульсного зсуву НВЧ приладу, 5 – НВЧ прилад, 6 – узгоджені навантаження, 7 – спрямований відгалужувач 20 дБ, 8 – атенюатор, 9 – вентиль, 10 – трансформатор повних опорів, 11 – генератор модулюючих сигналів, 12 - генератор НВЧ, 13 – трансформатор повних опорів, 14 – аналізатор спектру, 15 – детектор, 16 – осцилограф

Рисунок 2.6 – Структурна схема для вимірювання параметрів НВЧ приладу

Дослідження проводилося в 3-х сантиметровому діапазоні НВЧ (~10 ГГц, у режимі «на прохід»). Імпульсна потужність НВЧ крізь спрямований відгалужувач (який дозволяє визначити рівень падаючої потужності),

атенюатор, вентиль, проходить на вхідний електрод НВЧ приладу. Трансформатор повних опорів служить для узгодження хвиеводного тракту з НВЧ приладом. НВЧ прилад живиться імпульсами напруги від генератора імпульсів (тривалість імпульсу НВЧ дорівнює тривалості імпульсів зсуву). З виходу електроду НВЧ приладу сигнал надходить на узгоджене навантаження. Спрямований відгалужувач (~ 10 дБ) дозволяє визначити рівень прохідної потужності.

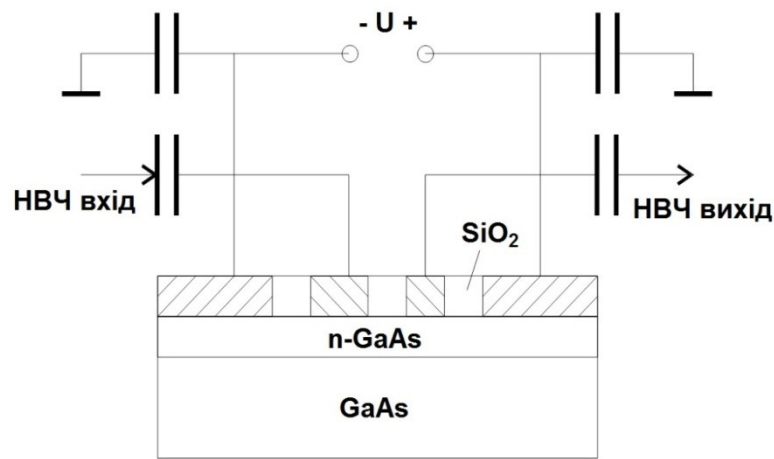


Рисунок 2.7 - МЕП-прилад з бар'єрами Шотткі типу транзистору біжучої хвилі

Робота МЕП-приладів з бар'єрами Шотткі типу транзистору біжучої хвилі заснована як на транзисторних механізмах, так і на ефектах, пов'язаних з міждолинним електронним переходом [4,5,33]. На рисунку 2.7 зображений МЕП-прилад з бар'єрами Шотткі типу транзистору біжучої хвилі. Зліва знаходиться вхідна область, в центрі - область біжучої хвилі і праворуч - вихідна область. Зміщення по постійному струму подається між двома великими сплавними контактами, які знаходяться на кінцях приладу (знак "-" на лівому контакті). Зміщення подається до двох менших контактів з бар'єрами Шотткі. Усі ці три зміщення напруги підбираються таким чином, щоб оптимізувати характеристики на НВЧ. Постійне зміщення між вхідним електродом і лівим великим сплавним контактом задає граничні умови по постійному струму на катодному кінці області біжучої хвилі і підтримує

електричне поле по всій області біжучої хвилі вище порога міждолинного електронного переходу. Запороговий профіль поля значно залежить від умов на катодному кордоні. Тому можливість електричного керування цими умовами є вельми важливою практичною перевагою цієї конструкції приладу. Постійне зміщення вхідного електроду задає також сталий струм і це дає можливість модулювати підсилення. Постійне зміщення на вихідному електроді визначає напругу в області біжучої хвилі, і дозволяє модулювати зсув фази. Постійні зміщення, прикладені до електродів з бар'єрами Шотткі, дозволяють електрично налаштовувати кожен прилад, компенсуючі невеликий розкид, що виникає в процесі виготовлення. У МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі типу ТБХ вхідна область впливає на коефіцієнт шуму і підсилення, область біжучої хвилі забезпечує можливість амплітудної, фазової та частотної модуляції, а також просторове розділення входу і виходу, що зменшує зворотний зв'язок. Вихідна область впливає на загальне посилення і потужність насичення. Зворотній зв'язок визначає межу стійкості.

Висновки до розділу 2

Для виготовлення та дослідження характеристик та параметрів омичних та інжектуючих бар'єрних переходів метал (сплав) - арсенід галію обрано вакуумний метод термічного напилення плівок, чотирьохзондовий метод вимірювання ВАХ, мостову схему для дослідження інжекційних властивостей омичних бар'єрних переходів.

Вимірювання опору контакту проводилося компенсаційним методом на постійному струмі.

Розрахунок питомого перехідного опору омичного контакту проводився методом еквівалентних схем.

Параметри інжекційних бар'єрних переходів (висоту потенційного бар'єру, фактор неідеальності, послідовний опір) визначали за методом вольт-амперних характеристик, коефіцієнт інжекції - за методикою, запропонованою С. Зі [37].

Розроблено схему та запропоновано методику вимірювання параметрів НВЧ приладів.

Результати даного розділу опубліковано у роботі [126].

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ОМІЧНИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ

При виготовленні напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем на арсеніді галію однією з найважливіших технологічних операцій є формування омічних контактів (ОК) [24-27,74,75,94]. Зниження опору ОК дозволяє зменшити опір пасивних областей і таким чином домогтися зниження коефіцієнта шуму [4,15] в МІС НВЧ підсилювачів, зниження прямих втрат у МІС НВЧ перемикачів та фазообертачів.

Параметри омічного неінжектуючого контакту метал-напівпровідник [37,39] (питомий перехідний опір ρ_k , лінійність ВАХ, коефіцієнтом інжекції γ та механічна міцність) залежать від різних факторів. Основна увага в відомих роботах по ОК приділяється вибору матеріалів [12,24,31,42,72-80], режимам підготовки поверхні [17,81-89] і вакуумного напилення [90-91], дослідженню морфології поверхні [92], режимам термообробки напилених структур [10,18,93,94], дослідженню структури межі розділу метал-напівпровідник [18,23,32], яка формується при виготовленні контакту.

На основі проведеного порівняльного аналізу існуючих технологій створення омічних контактів на основі срібла (розділ 1) поставлена задача розробки технології виготовлення омічного контакту до GaAs з $N_D = (1...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в якому за рахунок удосконалення попередньої обробки підкладки, нових режимів напилення і термічної обробки напиленої плівки Ag-Ge-In до GaAs, забезпечується зменшення глибини залягання межі розділу контакт-напівпровідник, поліпшення морфології поверхні контакту, зниження питомого перехідного опору і коефіцієнту інжекції.

3.1 Матеріал контакту

Для створення омичних бар'єрних переходів (омичних контактів) використовують подвійні або більш складні сплави на основі міді, срібла, золота, паладію з домішкою металів (кадмію, магнію, алюмінію, індію та ін.), котрі легко окислюються. Опір ерозії цієї групи сплавів базується на захисній дії оксидних плівок, що перешкоджають випаровуванню, але не перешкоджають контактній провідності. Сплави срібла подібного типу достатньо добре пручаються корозії, зберігаючи низький контактний опір [128].

Для створення контактів у приладах з арсеніду галію повинні використовуватися метали або сплави, які добре розчиняються у ньому або створюють евтектичний сплав. Розчинність металу у GaAs визначає ступінь можливого легування приконтактних шарів напівпровідника. Від розчинності арсеніду галію у металі залежить глибина вплавлення металу, від якої в свою чергу залежить якість отриманого омичного контакту. Цю розчинність можливо визначити з діаграми стану метал-миш'як-галій [127,129].

У [76,77,96,98] досліджено термічну стабільність тонких срібних плівок, оскільки при підвищенні температури може виникнути агломерація, що проявляється в зміні морфології та веде до зміни електричних характеристик плівок. В [77,98] було запропоновано для придушення явища агломерації вводити легуючі компоненти, перешкоджаючи зростанню зерен під час відпалу. При цьому важливе значення для Ag плівок мають не тільки ретельний підбір легуючих елементів, але і їх кількість.

Срібло під дією електричних розрядів окислюється, але оксиди срібла електропровідні та легко дисоціюють (температура дисоціації ~ 573 K). Внаслідок цього окислення майже не позначається на стійкості контактного опору срібних контактів. Срібло володіє схильністю до утворення непровідних плівок сульфідів Ag_2S в результаті взаємодії з сірководнем, сліди якого завжди присутні в атмосфері. Наявність вологи прискорює перебіг

реакції. Тому срібні контакти не рекомендується [128] застосовувати по сусідству з гумою, ебонітом чи іншими матеріалами, що містять сірку.

У [127] Мільвідський М.Г. та у [129] Panish M.B. навели діаграми стану для компонентів сплаву Ag-Ge-In до GaAs.

На діаграмі стану Ga-Ag [129] системи Ga-Ag-As складається з чотирьох фаз, що утворюються при перитектичних реакціях або в процесі переходів в твердий стан. Перитектичні перетворення відповідають 611 та 326 °C. Єдина у системі евтектика містить приблизно 97% (ат) Ga і плавиться при температурі 29,7 °C.

У системі Ag-As утворюється евтектика, що містить 25,3% (ат.) As, що плавиться при температурі 540 °C [127]. У області діаграми стану, збагаченої Ag, є перитектичне перетворення при 582 °C і декілька перетворень в твердій фазі [127].

У системі GaIn системи Ga-As-In твердий розчин арсеніду галію в індії містить до 10% (ат.) Ga [129]. Евтектична суміш цього твердого розчину з галієм містить біля 20% (ат.) In і плавиться при температурі 15,7 °C. У подвійній системі In-As утворюється одне з'єднання InAs, що конгруентно плавиться при температурі 942 °C. Таким чином, в системі Ga-In-As є два з'єднання GaAs і InAs з відкритим максимумом, і діаграма стану такої системи повинна складатися з трьох окремих потрійних систем.

У [129] показано, що у системі GaAs-InAs утворюється безперервний ряд твердих розчинів. Лінія ліквідусу і солідуса наведені у [129]. При вплавленні індію у арсенід галію у рекристалізованій області утворюються тверді розчини $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з різними x , і розчинність індію в арсеніді галію вказати важко. Глибина вплавлення індію у арсенід галію в залежності від температури та часу витримки при даній температурі визначається експериментально [129]. Фронт вплавлення індію у арсенід галію, орієнтованого за площиною (111), виходить пласким, а у арсенід галію, орієнтований за площиною (100) - опуклим.

Система GaGe у системі Ga-As-Ge є евтектичною [127]. Температура евтектики практично не відрізняється від температури плавлення чистого галію. У системі GeAs утворюються два подвійні з'єднання GeAs і GeAs₂, що конгруентно плавляться при температурах 737 і 732 °С відповідно. Таким чином, потрібна система Ga-As-Ge містить три потрібні з'єднання і поверхня ліквідусу діаграми стану цієї системи повинна складатися з шести полів первинної кристалізації компонентів GaAs, Ge, GeAs, GeAs₂, Ga і As.

Тому температури інваріантних чотирьохфазних перетворень в окремих трикутниках GaAs-Ge-GeAs і Ge-As-As-GaAs практично співпадають з евтектичними температурами простих подвійних систем GeAs [129].

3.2 Розробка ефективних методів пасивації поверхні GaAs

Типовий процес формування межі розділу GaAs з будь-яким матеріалом починається з підготовки поверхні пластини, яка повинна бути очищена від сторонніх забруднень відповідно до вимог [81,85,87-89], прийнятих в технології мікроелектроніки. При цьому поверхня піддається дії різних травників і очищуючих складів і, звичайно, повітря. Якщо нанести на чисту поверхню арсеніду галію будь-який матеріал, то властивості перехідної області з боку підкладки повинні відповідати чистому GaAs: рівень Фермі у GaAs на межі розділу повинен знаходитися біля середини забороненої зони.

Величина контактної опору омичного контакту визначається значною мірою технологією його створення. Результати досліджень [94,130] дозволили встановити, що для виготовлення омичних контактів необхідно отримувати у поверхні напівпровідника концентрацію домішок 10^{18} см^{-3} . Існують різні способи [33,38] збільшення концентрації носіїв заряду у приповерхневому шарі. Легування поверхні металом [85,89] відбувається при обробці поверхні напівпровідника у розчинах, що травлять або не травлять, які містять домішки різних металів.

У GaAs- іонно-ковалентний зв'язок. Особливість сполук $A^{III}B^V$ полягає у різній швидкості розчинення напівпровідників на площині (111) з гранями А і В, у яких різний характер хімічних зв'язків поверхневих атомів підкладки. При однаковому травнику сторона (111) В полірується (гладка, дзеркальна), сторона (111) А – матова з розвинутою мозаїчною структурою [89].

Хімічне полірування напівпровідникової підкладки проводять з метою згладжування нерівностей зі зменшенням шорсткості поверхні. Проведено порівняльний аналіз відомих поліруючих травників до GaAs.

Для хімічного полірування GaAs-підкладок використовують [96] лужний травник $H_2O_2(30\%):KOH(10\%) = 1:5$ та $1:20$. Цей травник безпечний у роботі, однак якість поліровки трохи гірша, ніж у сірчаноокислих травниках, особливо при глибині полірування більше 5 мкм.

Для хімічного полірування арсеніду галію широко використовують систему Br_2 -метанол [75,89], яка є універсальною системою травлення для $A^{III}B^V$, але значна токсичність її компонентів спонукає вести пошук нових, менш токсичних галогенвмісних та галогенвиділяючих травильних композицій. Задовільні результати хімічного полірування за якістю та станом поверхні пластин GaAs отримані у розчинах метанолу зі змістом бромиду від 2% до 5%.

У [75] описаний спосіб попередньої обробки GaAs-підкладки для отримання омичних контактів Ag-Ge-In/n-GaAs, у якому пластини епітаксійного n-GaAs піддавали хімічному поліруванню в суміші метилового спирту і бромиду (6:1) (за об'ємом). Питомий перехідний опір отриманих омичних контактів достатньо високий $\rho_k = (1,5 \dots 2) \cdot 10^{-2} - (8 \dots 9) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Відомі роботи [131,132], у яких відмовляються від поліруючих травників на основі перекису і сірчаної кислоти [132] та пропонують аміачно-перекисний травник для отримання матованої (шорсткої) поверхні арсеніду галію для покращення адгезії або відзначають [131], що аміачно-перекисний травник ніяк не впливає на характеристики приладів.

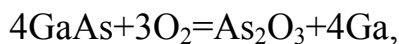
В [89] проведено порівняння якості поверхні GaAs при обробці травником складу $\text{NH}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:20:0) - поверхня хвиляста, $R_z \geq 0,06$ мкм, травником $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ (15-26):(4-6):(67-80) - поверхня дзеркальна, $R_z=0,07$ мкм, травником $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1) - дзеркальна поверхня з $R_z=0,02$ мкм. Таким чином, травлення в сірчаноокислому травнику дає якіснішу поверхню.

Досить розповсюдженими поліруючими травниками для GaAs є розчини на основі $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ [89] зі співвідношенням компонентів від 3:1:1 до 30:1:1, тобто з високим вмістом сірчаної кислоти. Згідно [89] зі збільшенням концентрації сірчаної кислоти у травнику швидкість полірування зменшується з 5-8 до 0,2 мкм/хв.

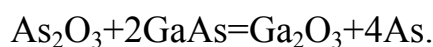
У [8] обробка поверхні GaAs проводилась у $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (2:1:50) та $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1), $\rho_k=1,9 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². У [94] хімічна обробка пластин GaAs у сірчаноокислому травнику з різним співвідношенням H_2SO_4 та H_2O_2 (1:2; 4:2; 3:1; 5:1) довела, що найкращі значення $\rho_k=7 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² отримані при травленні в суміші $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1).

Показано [17], що при травленні GaAs в кислих (pH=1-7) розчинах через селективне окислення і розчинення галію і миш'яку плівка на поверхні може складатися з оксиду галію (Ga_2O_3), оксиду миш'яку (As_2O_3) і елементарного миш'яку (As). Накопичення елементарного миш'яку пов'язано з тим, що швидкість процесу розчинення миш'яку залежить як від швидкості утворення оксиду, так і від швидкості подальшого його розчинення. Цією зміною швидкості окислення (концентрації окислювача) пояснюється порушення стехіометрії приповерхневої області арсеніду галію. Навіть при поліруючому травленні можливе порушення стехіометрії поверхні арсеніду галію на глибині декількох моношарів. Незважаючи на те, що в процесі хімічного травлення GaAs у розчині на основі сірчаної кислоти і перекиси водню ($5\text{H}_2\text{SO}_4:1\text{H}_2\text{O}_2:1\text{H}_2\text{O}$ [17]) вдається отримувати дзеркально-гладку поверхню, подальшу взаємодію її з киснем повітря в значній мірі визначає хімічну і топологічну неоднорідність поверхні. Також [17] показано, що на поверхні GaAs утворюється власний оксид, що складається в основному з Ga_2O_3 ,

невеликої кількості As_2O_3 і елементарного As. Утворення елементарного миш'яку у власному оксиді GaAs описується двома послідовними процесами: спочатку на поверхні швидко відбувається взаємодія адсорбованого кисню з атомами аніонної підґратки по реакції:



далі за такою ж схемою, але з меншою швидкістю протікає реакція у катіонній підґратці в утворення Ga_2O_3 і елементарного миш'яку. В результаті за кілька хвилин при нормальних умовах поверхня покривається суцільним шаром оксидів галію і миш'яку, який перешкоджає подальшому проникненню кисню вглиб підкладки. Потім відбувається твердофазна реакція на межі розділу між оксидом миш'яку і підкладкою GaAs з виділенням додаткової кількості елементарного миш'яку:



Ця реакція істотно повільніше першої, тому кількість елементарного миш'яку, що виділився, залежить від умов (температури і часу) зберігання підкладок арсеніду галію з власним оксидом [17]. Елементарний миш'як поряд з оксидною фазою є джерелом поверхневих електронних станів.

Порівняльний аналіз відомих [8,94,75,89] технологій обробки з метою отримання найнижчого ρ_k показав (таблиця 3.1, рисунок 3.1), що за станом та якістю поверхні пластин GaAs кращим травником є $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1).

Експериментальні дослідження. При проведенні хімічної обробки пластин GaAs у обраному сірчанокиислому травнику $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1) було рекомендовано додатково витримати пластину впродовж $(1...1,3) \cdot 10^3$ секунд у діоксіянтарній кислоті $\text{HOOC}-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{COOH}$ (тартарова кислота; 2,3-дігідроксібутандіова кислота, двоосновна оксикислота), промити

у гарячій, холодній дистильованій та деіонізованій воді та у метиловому спирті.

Таблиця 3.1

Результати порівняльного аналізу впливу способу хімічної обробки GaAs-підкладки на питомий перехідний опір контактів на основі срібла

Травник	Питомий перехідний опір контакту ρ_k , Ом·см ²				
	Партії GaAs-пластин				
	№1	№2	№3	№4	№5
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O (2:1:50) [8]	$1,9 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$				
Br ₂ -CH ₃ OH (1:6) [75]	$(1,5 \dots 2) \cdot 10^{-2} \dots (8 \dots 9) \cdot 10^{-3}$				
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O=3:1:1 [94]	$(7 \dots 9) \cdot 10^{-4}$				
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O=3:1:1 з витримкою у HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH експеримент	$7 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

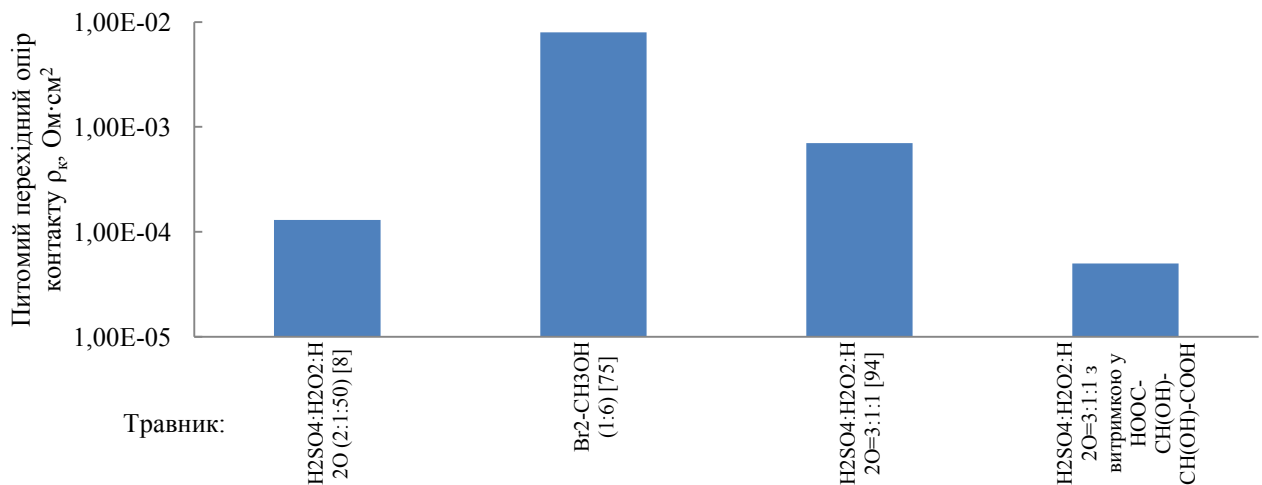


Рисунок 3.1 – Порівняльний аналіз впливу хімічної обробки GaAs на питомий перехідний опір омичних контактів на основі срібла.

Встановлено, що витримка у діоксиянтарній кислоті впродовж $(1 \dots 1,3) \cdot 10^3$ секунд після хімічного полірування в суміші $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-}1\text{H}_2\text{O}_2\text{-}1\text{H}_2\text{O}$ знижує значення питомого перехідного опору до $5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² (рисунок 3.1).

Додаткова витримка в органічній (діоксиянтарній) кислоті сприяє утворенню добре розчинних комплексних сполук і запобігає утворенню важкорозчинних продуктів реакції. Запропонований спосіб попередньої обробки дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів.

3.3 Вплив попереднього відпалу GaAs-підкладки на питомий перехідний опір контакту

Досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту Ag-Ge-In/n- n^+ GaAs (рисунок 3.2) попереднього відпалу пластин арсеніду галію після хімічної обробки. При термічному відпалі GaAs - пластини у вакуумі випаровуються фізично, хімічно адсорбовані гази з поверхні, гази і легуючі домішки з приповерхневого шару, відбуваються фазові перетворення в твердій фазі та термохімічні реакції.

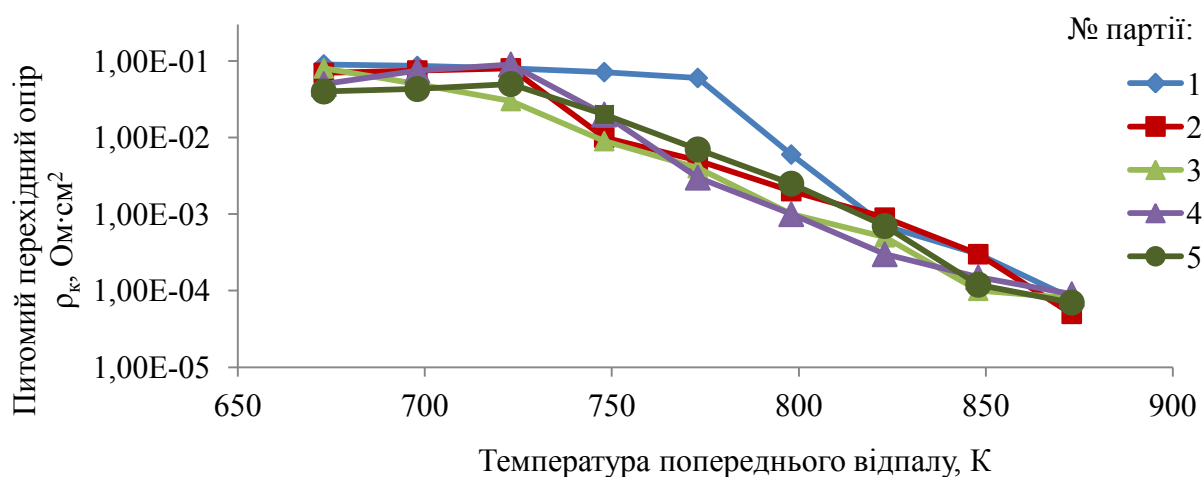


Рисунок 3.2 - Вплив попереднього відпалу підкладки на питомий перехідний опір контакту Ag-Ge-In/n- n^+ GaAs

У таблиці 3.2 наведено результати розрахунків питомого перехідного опору контакту ρ_k для контактів, які до напилення потрійного сплаву були відпалені при різних температурах. Встановлено (рисунок 3.2), що

додатковий попередній температурний відпал підкладки при 873 К впродовж 60 секунд у вакуумі при залишковому тиску порядку $2 \cdot 10^{-6}$ Торр знижує значення питомого перехідного опору омичних контактів до $\rho_k (5 \dots 7) \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

Встановлено, що адгезія, стан поверхні напиленої плівки та значення питомого перехідного опору залежать від способу попередньої обробки GaAs.

Таблиця 3.2

Результати розрахунку питомого перехідного опору контактів ρ_k , підкладка яких пройшла попередній відпал

Температура попереднього відпалу GaAs-підкладки, К	Питомий перехідний опір контактів ρ_k , Ом·см ²				
	Партії GaAs-пластин				
	№1	№2	№3	№4	№5
673	$9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
698	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
723	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
748	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
773	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
798	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
823	$7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
848	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
873	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Час відпалу, с	30	60	90	120	150

Таким чином доведено, що якість омичного контакту поліпшується, якщо GaAs-підкладку після знежирення в суміші толуолу і метилового спирту (1:2), хімічної обробки у сірчанокиислому травнику витримати у діоксидантарній кислоті протягом $1,2 \cdot 10^3$ секунд та додатково відпалити у вакуумі не гірше $1,2 \cdot 10^{-6}$ Торр при температурі 873 К впродовж 60 секунд.

3.4 Вплив режимів нанесення сплаву та термічної обробки омічних бар'єрних переходів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs на питомий перехідний опір

Нанесення контактного матеріалу зазвичай проводять на підігріту підкладку, температура якої 473 К – 673 К. При дуже низькій температурі осаджувані атоми не можуть мігрувати поверхнею, проте при цьому можуть утворюватися острівці різної товщини. Занадто висока температура викликає зворотне випаровування (ревипаровування) осаджуваних атомів з підкладки.

Опір контактів на основі срібла до арсеніду галію також дуже критичний до режиму вплавлення [94,75,77,80,136-140].

У [94] потрібний сплав Ag-Ge-In наносили на підкладку з концентрацією носіїв $8 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, температура якої складала 473...523 К, відпал напильної структури проводили при температурі 873 К, $\rho_k = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Недоліком способу є недостатньо низьке значення питомого перехідного опору ρ_k .

У [75] при створенні омічних контактів Ag-Ge-In/n-GaAs напильня потрібного сплаву проводили у вакуумі на підкладку з концентрацією носіїв $N_D = 8 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, температура якої була 423-453 К, відпал проводили при температурі 923 К впродовж 10 хвилин. Питомий перехідний опір таких контактів складав $\rho_k = (1,5 \dots 2) \cdot 10^{-2} \div (8 \dots 9) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

У [77] при створенні напильної структури Ag-Ge-In /n-GaAs (100) з $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при температурі відпалу вище 913 К починається мікросегрегація, виникає агломерація, питомий перехідний опір контактів зростає ($\rho_k > 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$).

Експериментальні дослідження. Формування структури омічного контакту шляхом відпалу проводилося у вакуумі не гірше $(2 \dots 6) \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$ на установці ВУП-4. Відпал контакту необхідний для введення у область межі контакту домішки або, можливо, дефектів. Процеси попереднього відпалу GaAs-підкладки (після хімічної обробки), нанесення потрібного сплаву

методом термічного випаровування та термообробка одержаної структури контакту проводилися у єдиному вакуумному циклі.

Було досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту температури підкладки при термічному випаровуванні матеріалу контакту (температура випаровування компонентів сплаву: In – 2273 K, Ag – 2483 K, Ge – 3103 K [127,129]), швидкості підйому температури відпалу, температури та часу відпалу, швидкості охолодження контакту. Вольт-амперні характеристики контактів вимірювали чотирьохзондовим методом (розділ 2). Вимірювання опору контактів проводилося компенсаційним методом на постійному струмі. При розрахунку величини питомого перехідного опору використовувався метод еквівалентних схем [13,114,134].

Вибір оптимальних значень температурної обробки контактів до GaAs з $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ визначався необхідністю створити шар з підвищеною концентрацією електронів за рахунок легування германієм. Режим відпалу контакту повинен забезпечити мінімальний питомий перехідний опір контакту та неглибоке залягання межі розділу метал-напівпровідник.

Вплив температури підкладки. Напилення контактного матеріалу проводилося на попередньо підігріту підкладку (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

Вплив температури підкладки при напиленні на питомий перехідний опір контактів ρ_k ($t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}}=\text{const}$)

Температура підкладки, K	Питомий перехідний опір, Ом·см ²		
	№ партії		
	1	2	3
423	$2 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
453	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
483	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
513	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

За результатами дослідження (рисунк 3.4) найкращу адгезію контактного матеріалу до арсеніду галію одержано при температурі підкладки 453 K, $\rho_k=(4...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

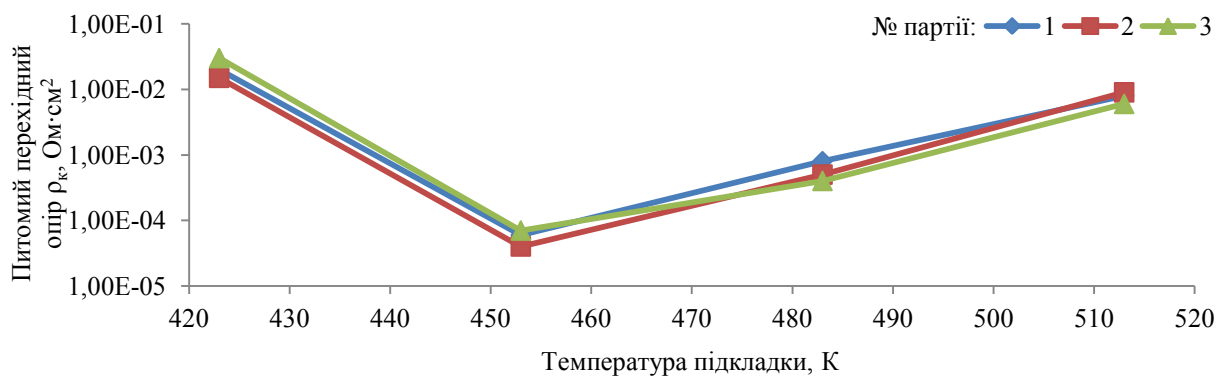


Рисунок 3.4 – Залежність питомого перехідного опору омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs від температури підкладки при напиленні, ($t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}} = \text{const}$)

Таблиця 3.4

Вплив температури та часу відпалу на питомий перехідний опір контактів ρ_k

Температура відпалу контакту, К	Час відпалу, С	Питомий перехідний опір контактів ρ_k , Ом·см ²
693	60	$(7...9) \cdot 10^{-2}$
	180	$(1...2) \cdot 10^{-1}$
	300	$(7...9) \cdot 10^{-1}$
743	60	$(6...7) \cdot 10^{-2}$
	180	$(6...9) \cdot 10^{-2}$
	300	$(3...5) \cdot 10^{-2}$
793	60	$(6...8) \cdot 10^{-3}$
	180	$(2...4) \cdot 10^{-2}$
	300	$(4...6) \cdot 10^{-2}$
843	60	$(6...9) \cdot 10^{-4}$
	180	$(1...2) \cdot 10^{-2}$
	300	$2 \cdot 10^{-2} ... 9 \cdot 10^{-3}$
893	60	$(5...7) \cdot 10^{-5}$
	180	$(6...8) \cdot 10^{-3}$
	300	$1,7 \cdot 10^{-2} ... 7 \cdot 10^{-3}$
943	60	$(3...5) \cdot 10^{-4}$
	180	$(1...3) \cdot 10^{-2}$
	300	$(1...2) \cdot 10^{-2}$

Вплив режимів відпалу. Досліджували залежності питомого перехідного опору омичних контактів ρ_k від температури та часу відпалу у

діапазоні температур 693...943 К та часу відпалу 60...300 секунд при $t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}} = \text{const}$ (таблиця 3.4).

Встановлено (рисунок 3.5), що час та температура відпалу контактної структури істотно впливають на якість омичного контакту. Кращі результати $\rho_k = (5...7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ отримані при температурі відпалу 893 К та часі відпалу 60 с.

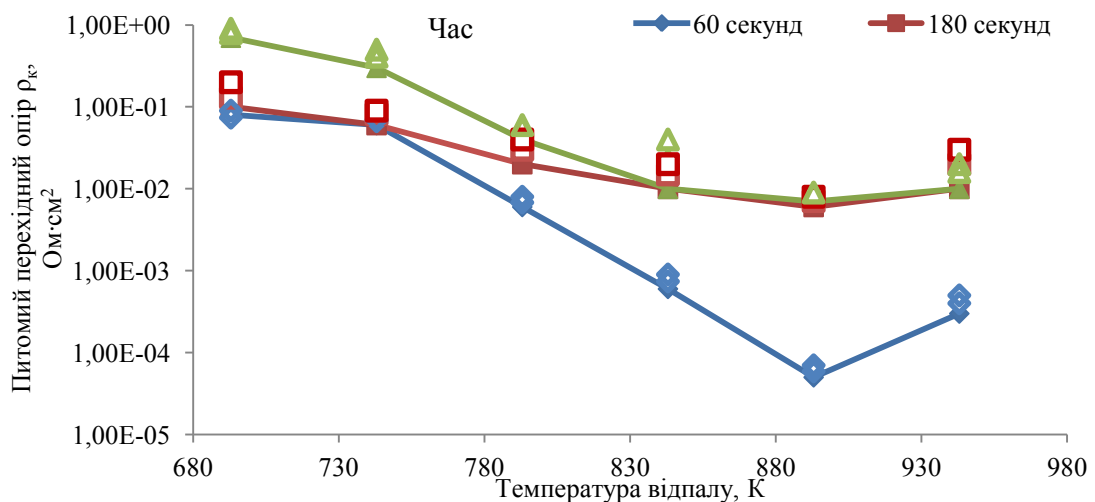


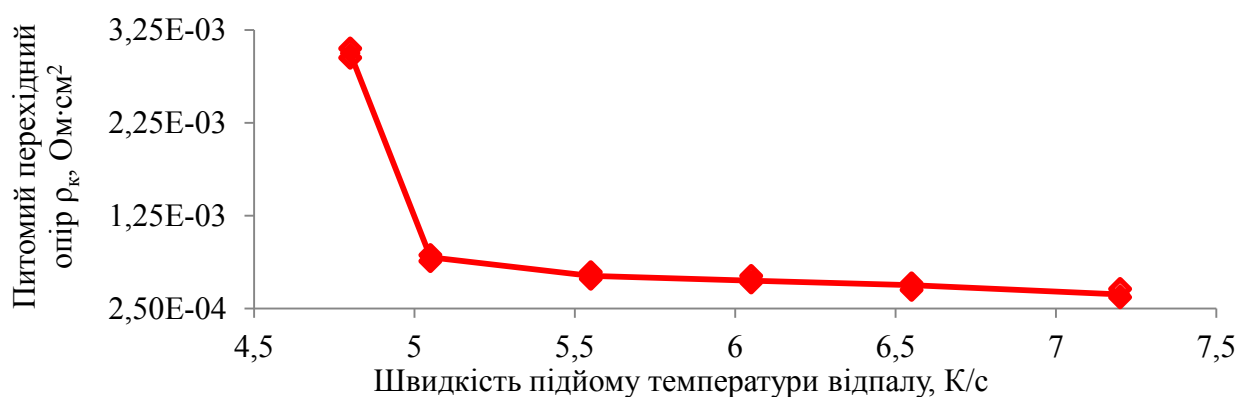
Рисунок 3.5 - Залежність питомого перехідного опору омичних контактів ρ_k від температури та часу відпалу. ($t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}} = \text{const}$).

Вплив швидкості підйому температури відпалу та швидкості охолодження контакту після відпалу. Досліджували також вплив на значення питомого перехідного опору омичних контактів ρ_k швидкості підйому температури відпалу у діапазоні 4,8...7,2 К/с та швидкості охолодження контакту у діапазоні 4,65...4,75 К/с. Розраховано величину питомого перехідного опору омичних контактів ρ_k .

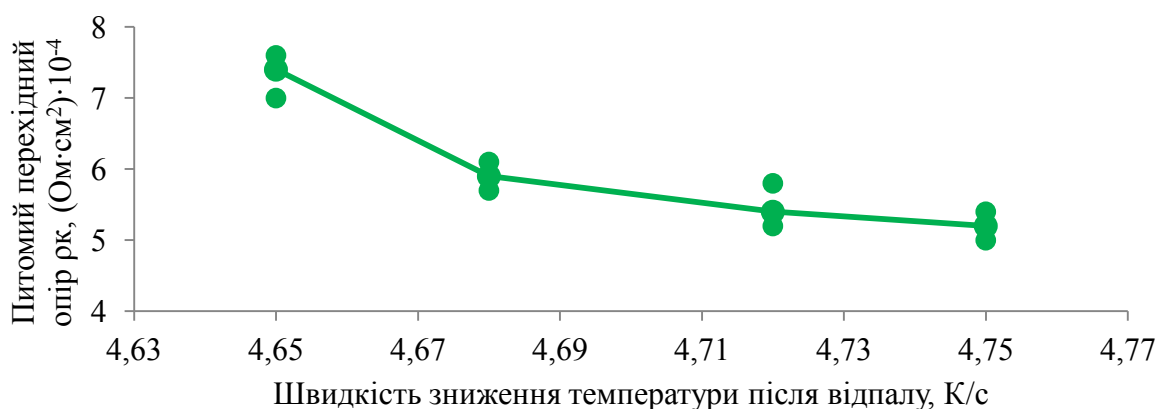
Встановлено, що збільшення швидкості підйому температури відпалу від 5,55 К/с до 7,2 К/с призводить до незначного зниження величини питомого перехідного опору (рисунок 3.6, а). Рекомендована швидкість підйому температури відпалу 7,2 К/с.

Зміна швидкості охолодження контакту після відпалу в інтервалі 4,72...4,75 К/с. (рисунок 3.6, б). практично не впливає на значення питомого

перехідного опору. Рекомендована швидкість охолодження контакту після відпалу 4,75 K/c.



а)



б)

Рисунок 3.6 - Залежність питомого перехідного опору омичних контактів ρ_k від швидкості підйому температури відпалу (а) та швидкості охолодження контакту (б). ($t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $t_{\text{підкл}} = \text{const}$).

На рисунку 3.7 показана вольт-амперна характеристика омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, виготовлених при оптимальному режимі термічної обробки (час відпалу 60 секунд). Лінійність ВАХ виготовлених омичних контактів не порушувалась при нагріві до температури 453 К.

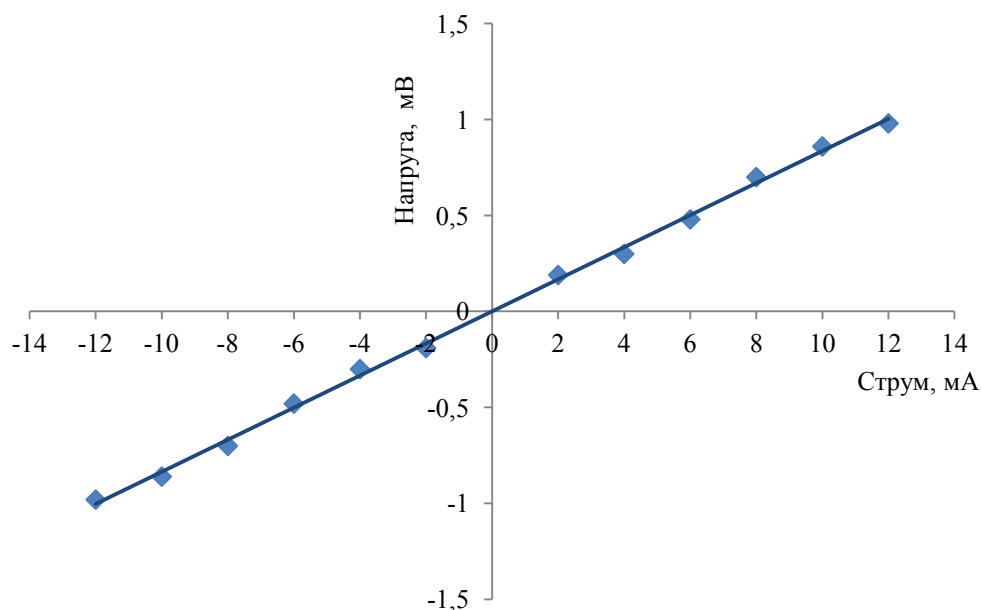


Рисунок 3.7 – Вольт-амперна характеристика омичного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, $T_{\text{відп}}=893\text{ K}$, $\tau_{\text{відп}}=60\text{ c}$

Автори [109] стверджують, що плівкові структури метал-GaAs мають високий ступінь нерівноважності, одним з проявів якої є формування на міжфазній межі протяжних перехідних областей, просторово неоднорідних за хімічним складом і структурою. Вважають [108], що для переходів метал-GaAs, сформованих конденсацією металу на реальну окислену поверхню напівпровідника, домінуючим процесом, що визначає властивості перехідного шару, є взаємодифузія компонент гетероструктури з переважанням проникнення Ga в шар металізації. Взаємодія металу з GaAs супроводжується зміною стехіометрії, рівня легування і структури приповерхневого шару напівпровідника, виникає перехідна область, просторово і композиційно неоднорідна.

У роботах [32,72,77,80,135] визначено, що при формуванні контактів метал-GaAs перехідний шар забезпечує поступовий перехід від кристалічної ґратки монокристалу до ґратки наростаючої фази та підкладки.

Доведено [32,72,94,135,139], що термообробка впродовж часу, що забезпечує дифузію компонентів в області контакту, змінює склад перехідного шару за глибиною в повній відповідності до діаграми стану.

У [94,139] показано, що металевий шар після відпалу при оптимальному режимі, досліджений на електронному мікроскопі просвічуючого типу має кристалічну структуру нерівномірну за складом, яка складається, в основному, з компонентів металів Ag, Ge, In. Германій в поєднанні зі сріблом призводить до отримання n^+ -шарів в арсеніді галію. Індій запобігає збиранню в краплі евтектичного сплаву, забезпечуючи однорідність фронту вплавлення.

3.5 Інжекційні властивості омічних бар'єрних переходів

Одними з основних параметрів, що характеризують інжекційні властивості омічних бар'єрних переходів (омічних контактів), є рівень інжекції γ і швидкість рекомбінації носіїв θ [124-126]. У розділі 2 проаналізовано ряд відомих методик для визначення цих параметрів, що підрозділяються за родом використовуваного при вимірюваннях струму.

З багатьох відомих [124-126] методів вимірювання такого важливого інжекційного параметра контактів, як коефіцієнт інжекції γ , були обрані методи дослідження на змінному струмі та імпульсний метод вимірювання, як найбільш точні, в порівнянні з методами вимірювань на постійному струмі. Вони не вимагають руйнування приладів для додання зразкам особливої форми.

Встановлено, що при імпульсних методах дослідження інжекційних властивостей невикривляючих контактів через короткочасну дію на контакт електричного струму виключається цілий ряд методичних помилок.

Методика дослідження питомого перехідного опору омічного контакту наведена в розділі 2.

Метод дозволив визначити коефіцієнт інжекції невикривляючих контактів. Проте, контроль балансу моста можна було проводити тільки під час проходження імпульсів. До того ж величина γ залежала від швидкості

рекомбінації носіїв на бічних межах кристала та від якості обробки його поверхні.

Для отриманих контактів з питомим перехідним опором $\rho_k = (0,5 \dots 2) \cdot 10^{-4} - (5 \dots 7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ коефіцієнт інжекції $\gamma = 0,07 \div 0,00$. При відхиленні від рекомендованих режимів виготовлення омічного контакту значення питомого перехідного опору збільшувалось та складало $\rho_k = (3 \dots 18) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, коефіцієнт інжекції $\gamma = 0,41 \div 0,83$.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено технологію виготовлення багатокомпонентних металевих контактних систем Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs.

2. Експериментально досліджено залежність питомого перехідного контактного опору від хімічної та термічної обробки підкладки, умов осадження плівки потрійного сплаву Ag-Ge-In (75% Ag, 20% Ge, 5% In) та режимів термообробки омічних контактів:

- доведено, що попередній температурний відпал у вакуумі GaAs-підкладки при 873 К впродовж 60 секунду у вакуумі після хімічної обробки у сірчанокиислому травнику та діоксіантарної кислоті, знижує питомий перехідний опір омічного контакту;

- встановлено, що омічні контакти Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs мають питомий перехідний опір ($\rho_k = (5 \dots 7) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при нанесенні матеріалу контакту на підігріту до температури 453 К підкладку і відпалу отриманої структури при 893 К упродовж 60 с у вакуумі, швидкості підйому температури відпалу 7,2 К/с і швидкості охолодження контакту після відпалу 4,75 К/с. Лінійність ВАХ омічних контактів не порушувалась при нагріві до температури 453 К.

Математична обробка результатів досліджень параметрів контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs та похибок вимірювання у пакеті програм Excel наведена у додатку А.

Довірчий інтервал $P(95\%)=4,98 \cdot 10^{-5} \div 4,99 \cdot 10^{-5}$, $P(99\%)=4,98 \cdot 10^{-5} \div 4,99 \cdot 10^{-5}$.

На розроблений спосіб виготовлення омічних бар'єрних переходів до GaAs отримано Патент України на корисну модель № 119444 (2017 р.) [139].

Результати даного розділу опубліковано у роботах [84,108,136-139,164,165].

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ТА РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ ІНЖЕКТУЮЧИХ БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ СРІБЛА ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ

На підставі проведеного порівняльного аналізу (розділ 1) відомих технологій отримання бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs поставлена задача - розробити технологію виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів до GaAs з $N_D=(1...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в якому за рахунок попередньої обробки підкладки, нових режимів напилення та термічної обробки напиленої плівки Ag до GaAs, забезпечується поліпшення морфології поверхні контакту, підвищення висоти потенційного бар'єру, підвищення відтворюваності параметрів виготовлення контактів і, як наслідок, покращення характеристик приладів, в яких використовуються такі контакти.

4.1 Особливості методу формування інжектуючих бар'єрних переходів.

Важливе значення для отримання якісного бар'єрного переходу має метод нанесення контактного матеріалу [90,91] на підкладку. Осадження металу шляхом конденсації парів у вакуумі є достатньо складним процесом, який залежить принаймні від двох чинників: хімічних реакцій та перенесення речовини. На сьогодні досягнуто лише якісне розуміння цих явищ. В нерівноважних умовах можна отримати тверді розчини в набагато ширшому інтервалі складів, ніж ті, які відповідають фазовій діаграмі, та навіть такі, яких не існує в рівноважних умовах. Передумовами для виникнення твердих розчинів відповідно до емпіричних умов Юм-Розера [135] є близькість

(відмінності менше 10-15%) атомних радіусів двох елементів і хімічна схожість взаємодіючих компонентів.

При нанесенні на GaAs-підкладку плівки срібла методом вакуумного випаровування за рахунок теплоти конденсації та можливих хімічних реакцій відбувається руйнування ґратки в приповерхневому шарі напівпровідника ще до формуванні суцільної металевої плівки [135,156]. Наслідки цієї стадії значною мірою визначаються умовами нанесення контакту й режимами термообробок.

Процеси, які відбуваються при взаємодії металів з напівпровідниковими сполуками A_3B_5 , є предметом інтенсивних досліджень [101,135,156], що підтвердили різноманітні складності процесів, протікаючих в контактах на межі розділу фаз. Тому для більшості контактних пар основним джерелом інформації про міжфазні взаємодії залишається експеримент, а деякі теоретичні оцінки можуть бути отримані лише для окремих випадків.

Для контактних пар метал-GaAs хімічні тенденції у формуванні міжфазної межі виражені гірше, ніж для інших напівпровідників A_3B_5 [150,156]. Au, Cu, Ag утворюють групу металів, результатом взаємодії яких з GaAs є взаємна дифузія та перемішування двох матеріалів [150]; катіони напівпровідника сегрегують в плівці металу, а також беруть участь в утворенні сплавів.

Найбільш очевидною причиною утворення перехідного шару є виділення енергії при конденсації атомів металу на поверхні напівпровідника. Цей надлишок енергії, дорівнює за порядком величині теплоті сублімації, виділений в локалізованому обсязі за дуже короткий час та викликає «термічний удар». Збільшення розмірів перехідної області може бути обумовлено присутністю в конденсованому потоці атомів металу іонізованих прискорених частинок, які зазвичай є неконтрольованим фактором методики термічного напилення, а також наслідком ряду інших фізичних механізмів, наприклад, проникненням атомів металу в міжвузля напівпровідника. Це призводить до перерозподілу електронної щільності

атомів, що утворюють ковалентні зв'язки [135,156]. В результаті хімічний зв'язок послаблюється й енергетичний бар'єр для реакції знижується. Все це призводить до формування перехідних областей неоднорідного хімічного складу в контактах метал-напівпровідник.

Окрім температурного фактору на дифузію атомів напівпровідника в метал можуть чинити істотний вплив електричні поля, викликані адсорбцією атомів металів. Електроміграція в поєднанні з хімічним зв'язуванням може призводити до різноманітних змін співвідношення компонент напівпровідника як на межі розділу, так і в перехідному шарі.

Автори [135] стверджують, що у сполуках A_3B_5 при збільшенні негативного заряду компоненти А і позитивного заряду компоненти В (або навпаки) підсилюється тенденція до утворення стабільних сполук замість гомогенних розчинів. Це пов'язано з тим, що стійкість деяких інтерметалічних фаз визначається концентрацією електронів. В нерівноважних умовах можна отримати тверді розчини в набагато ширшому інтервалі складів, ніж ті, які відповідають фазовій діаграмі, і навіть такі, яких не існує в рівноважних умовах.

Дослідження реакційної активності пар Me-GaAs підтвердили [9,105,135,141] хімічну пасивність межі розділу, що формують Ag, Ga, In, Sb і Sn з GaAs.

4.2 Обробка поверхні GaAs

Обробка поверхонь напівпровідників проводиться за допомогою різних хімічних процесів в ході виготовлення приладів [9,81,84,85,87-88,158]. Хоча багато хто ці процесів називає очищенням, насправді вони полягають в утворенні хімічно сполучених з поверхнею плівок, які, будучи закінченням ґраток, забезпечують прийнятну щільність поверхневих станів. Якщо поверхня напівпровідника підготовлена так, що зміна електричного поля на

поверхні, виникаюча в процесі роботи приладу, і зміни в зовнішньому середовищі помітно не змінюють характеристики приладу, то вона є пасивованою.

У результаті сумісної дії різних джерел поверхневих станів, наприклад, обриву періодичного потенціалу кристала (рівні Тамма, їх щільність 10^{15} см^{-3} [37]), дії адсорбованих сторонніх атомів (донорів або акцепторів) або дислокацій, або механічної напруги, або відмінного від об'ємного розподілу власних атомів напівпровідника в поверхневому шарі і т.д., щільність поверхневих станів менша за таммівську.

При малій щільності поверхневих станів хвильові функції електронів, що знаходяться на них, перекриваються слабо, і їх енергетичні рівні лежать у країв зон. При цьому рівень Фермі на поверхні може вільно переміщуватися по всій забороненій зоні E_g . Зі збільшенням щільності поверхневих станів настає деяке критичне перекриття хвильових функцій, після якого рівні домішкових станів зміщуються до середини забороненої зони, де утворюють вузьку зону. У кристалів з ковалентним зв'язком рівень Фермі жорстко пов'язаний з зоною домішкових станів і для великої групи напівпровідників (германій, кремній, антимонід індію, арсенід галію та ін.) знаходиться на відстані $2/3E_g$ від дна зони провідності. Проте для інших напівпровідників (фосфід індію, антимонід галію, телурид кадмію, селенід кадмію) рівень Фермі на поверхні має інше енергетичне положення. Ця відмінність пов'язана зі збуренням періодичного потенціалу кристалу [37], яке сильне в діагонально побудованих напівпровідниках (у них один з атомів має значно більшу масу).

Арсенід галію відрізняється від металів і елементарних напівпровідників структурними особливостями, обумовленими наявністю в ньому двох типів атомів, тому кінетичні закономірності як у стадії окислення, так і в стадії розчинення окислених форм набувають складного характеру.

Хімічній обробці GaAs присвячений ряд робіт [9,81,84,85,87-88,158], але питання кінетики і механізмів реакцій в цих системах все ще не можна

вважати вирішеними. Якщо при виготовленні бар'єрного переходу здійснювати ретельний контроль всіх процесів і наносити метал на добре очищену поверхню в умовах високого вакууму [158], то можна спостерігати зміну властивостей контакту.

Метою експерименту було визначення впливу хімічної обробки GaAs-підкладки з $N_D = (1 \dots 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на висоту бар'єрного переходу Ag/n-n⁺GaAs.

На адгезію плівки впливає склад залишкових газів в робочому об'ємі пристрою в процесі осадження, який може призвести до виникнення окисного шару.

При обробці арсеніду галію видалення маслянистих забруднень з поверхні GaAs-підкладки здійснюють в органічних розчинниках.

Проаналізовані відомі [11,111,132,141,142] технології обробки поверхні GaAs при формування бар'єрного переходу Ag/GaAs:

- у [141] рекомендована обробка пластини GaAs у толуолі і метанолі, у травнику $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ (висота бар'єру 0,9...0,95 В);
- у [11] рекомендована обробка поверхні арсеніду галію у ацетоні і метанолі, у $\text{HCl:H}_2\text{O}$ (висота бар'єру 0,82 В);
- у [111] використовували зколоту у надвисокому вакуумі поверхню GaAs (висота бар'єру - 0,9 В);
- у [142] підкладка GaAs оброблялась у трихлоретилені, ацетоні і метанолі, 50% HCl (висота бар'єру - 0,78 В);
- у [132] для обробки арсеніду галію використовували 10%-вий розчин нітриду лужних металів і (68-72%) азотну кислоту, розчин $\text{NH}_4\text{OH:H}_2\text{O}$ (1:10), при цьому отримана поверхня матова, шорстка.

Експериментальні дослідження. Досліджено вплив рекомендованої у главі 3 технології хімічної обробки GaAs на висоту бар'єрного переходу Ag/n-n⁺GaAs. Було встановлено, що додаткова обробка пластини GaAs у комплексоутворювачі $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$ після обробки у толуолі і метиловому спирті, у сірчанокиислому травнику $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ при створенні контакту Ag/n-n⁺GaAs при рекомендованому режимі

термообробки підвищує висоту бар'єру до 0,96...0,98 В (таблиця 4.1, рисунок 4.1).

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз залежності висоти потенційного бар'єру Ag/n-GaAs від способу попередньої обробки поверхні GaAs

Спосіб попередньої обробки	Висота бар'єрного переходу, В
трихлоретилен, ацетон та метанол, 50% HCl [142]	0,78
зколота у надвисокому вакуумі поверхня GaAs [111]	0,9
HCl:H ₂ O [11]	0,82
3H ₂ SO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O [141]	0,9...0,95
3H ₂ SO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O з витримкою у HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH експеримент	0,96...0,98

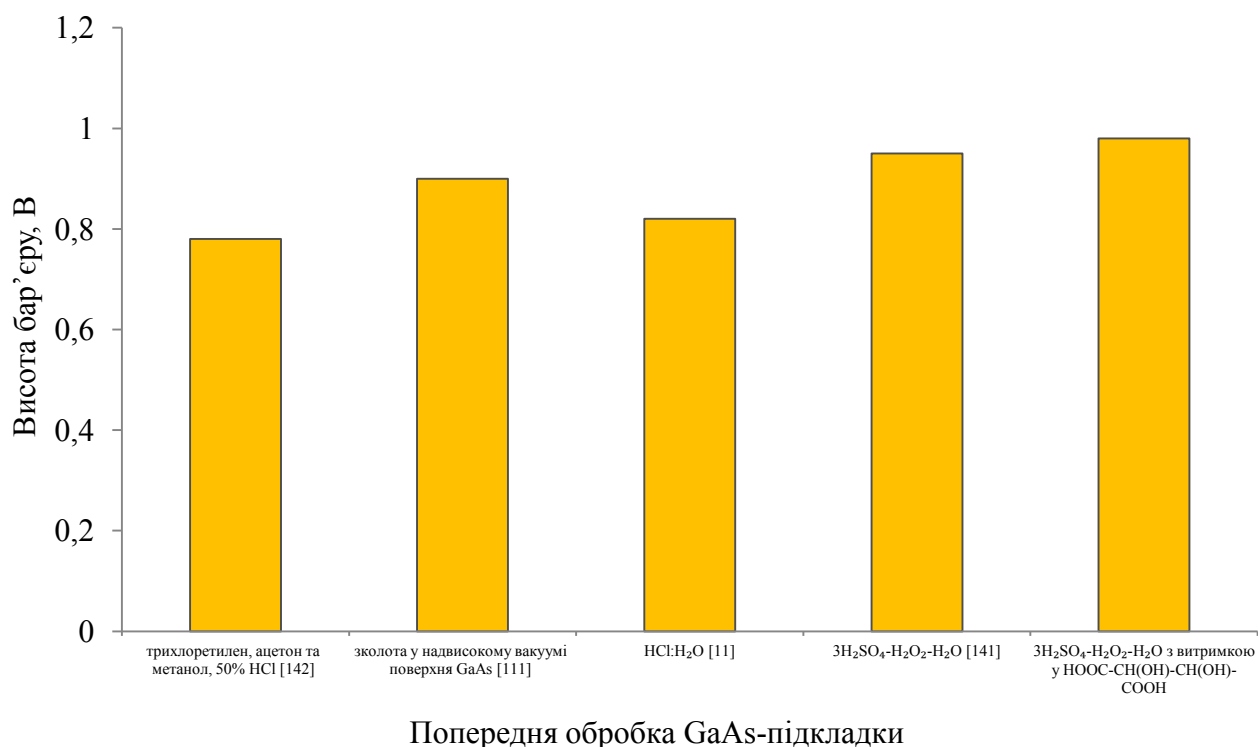


Рисунок 4.1 – Порівняльний аналіз залежності висоти потенційного бар'єру Ag/n-GaAs від способу попередньої обробки GaAs-підкладки

Таким чином, для хімічної обробки поверхні GaAs обрано рекомендований у главі 3 спосіб: знежирення у суміші толуолу і метилового спирту, полірування у суміші $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ з витримкою у комплексоутворювачі $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$.

Рекомендована попередня обробка GaAs-підкладки призводить до підвищення висоти потенційного бар'єру до 0,96...0,98 В.

4.3 Вплив режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs на їх параметри

Від особливостей зернистої структури плівки металу залежить протікання ряду фізико-хімічних процесів на межі метал-напівпровідник [108]: дифузія напівпровідника в метал, структурна перебудова плівок при введенні нерівноважної концентрації домішок, дефектів, твердофазні хімічні реакції, дефектоутворення, окислення, процеси при проходженні струму та ін. При протіканні твердофазної реакції між напівпровідником і металом відбувається утворення зародків зростаючого шару.

Експериментальні дослідження. Було досліджено вплив термообробки на властивості інжектуючого бар'єрного переходу на основі срібла до n-GaAs з $N_D=(1...3)\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Висота бар'єру ϕ_B визначалася у даній роботі за методом вольт-амперної характеристики [37]. ВАХ контактів вимірювали чотирьохзондовим методом.

Вплив температури підкладки. Проведено дослідження впливу температури підкладки на параметри інжектуючого бар'єрного переходу срібло-арсенід галію. Для різних партій пластин GaAs, що пройшли рекомендовану попередню обробку, після досягнення залишкового тиску не гірше 10^{-6} Торр у вакуумному об'ємі підвищували температуру підкладки перед напыленням срібла до різних температур від 343 до 543 К (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2

Вплив температури підкладки при осадженні Ag на висоту потенційного бар'єру ($t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}} = \text{const}$)

Температура підкладки, К	Висота бар'єру, В					Тривалість відпалу, x10 ² с
	№ партії зразків					
	1	2	3	4	5	
343	0,51	0,56	0,58	0,58	0,58	3
	0,55	0,63	0,65	0,65	0,65	6
	0,7	0,72	0,73	0,7	0,74	9
393	0,56	0,6	0,63	0,63	0,63	3
	0,8	0,82	0,84	0,83	0,84	6
	0,77	0,75	0,77	0,76	0,77	9
443	0,5	0,52	0,54	0,5	0,5	3
	0,7	0,68	0,65	0,68	0,68	6
	0,63	0,65	0,66	0,64	0,65	9
493	0,47	0,49	0,49	0,49	0,48	3
	0,65	0,65	0,65	0,66	0,67	6
	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	9
543	0,48	0,49	0,48	0,49	0,48	3
	0,65	0,63	0,66	0,64	0,65	6
	0,56	0,58	0,59	0,6	0,57	9

Найкращі значення $\phi_{\text{Вп}}$ отримані при нанесенні срібла на підкладку при 393 К (рисунок 4.2), незалежно від подальшої термообробки виготовленого контакту.

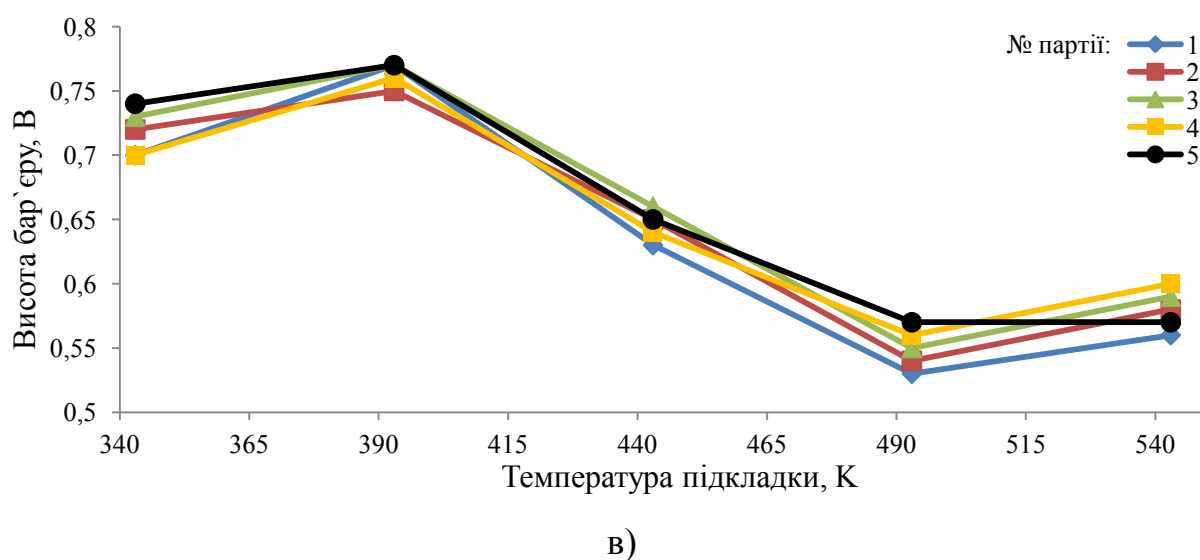
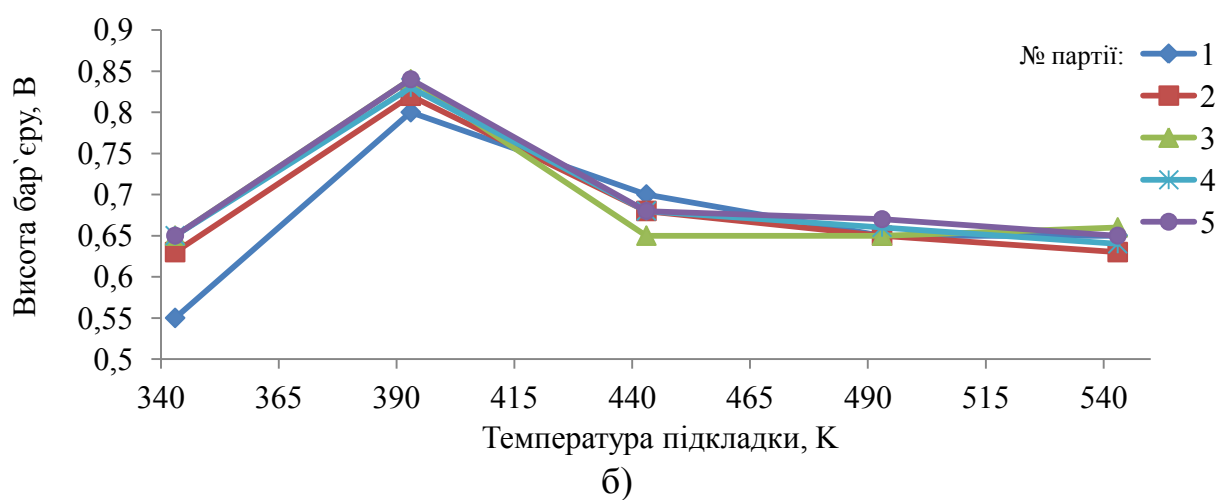
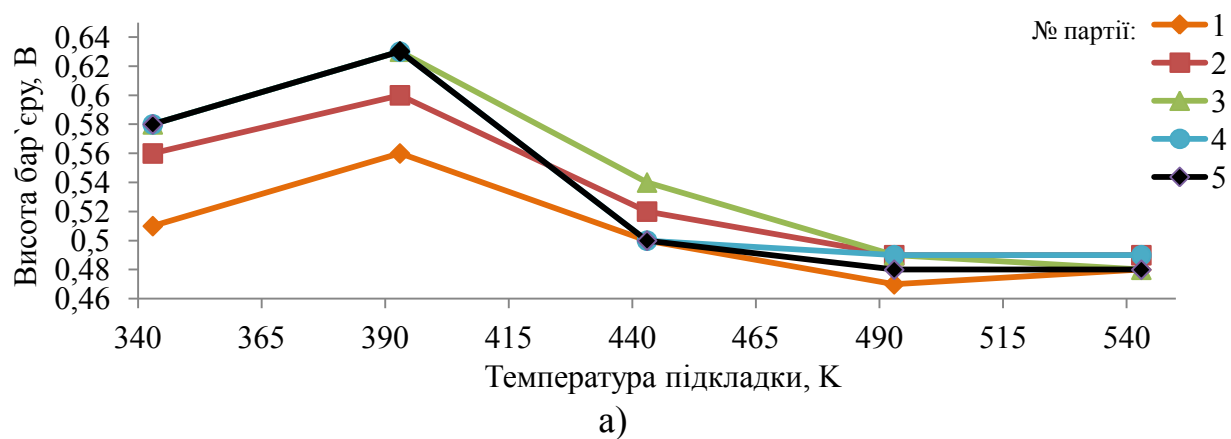


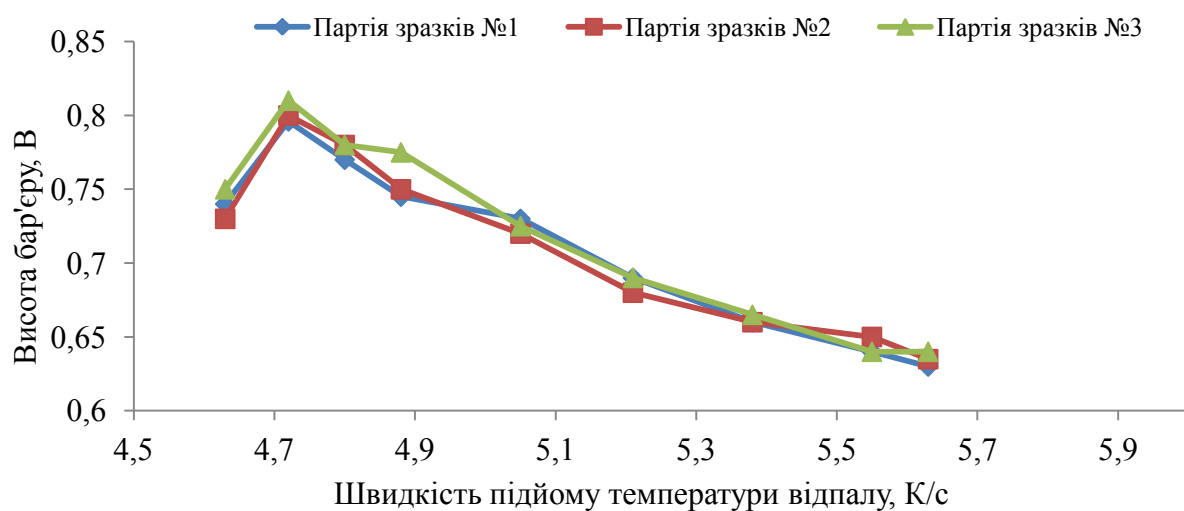
Рисунок 4.2 – Залежність висоти потенційного бар'єру від температури підкладки ($t_{\text{відп}}$, $t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{охол}}$, $V_{\text{нагр}}$ =const). Час відпалу: а) $3 \cdot 10^2$ с, б) $6 \cdot 10^2$ с, в) $9 \cdot 10^2$ с

Вплив швидкості підйому температури відпалу та швидкості охолодження. Досліджено вплив швидкості підйому температури відпалу та швидкості охолодження на висоту бар'єру виготовлених структур Ag/n- n^+ GaAs. Після нанесення плівки срібла на GaAs-підкладку методом вакуумного випаровування підвищували температуру відпалу з різною швидкістю (таблиця 4.3). Результати досліджень представлено на рисунку 4.3. Незалежно від режиму відпалу найкращі результати отримано при $V_{\text{нагр}}=4,72$ K/c.

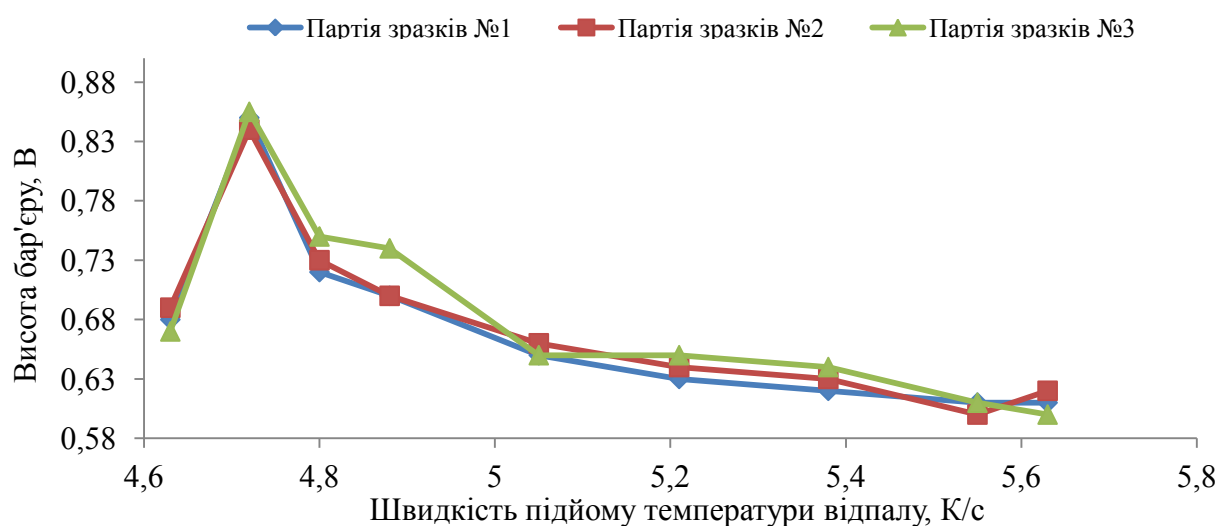
Таблиця 4.3

Вплив швидкості підйому температури відпалу на висоту потенційного бар'єру ($t_{\text{підкл}}$, $t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $V_{\text{охол}}=\text{const}$)

Швидкість підйому температури відпалу, K/c	Час відпалу, $\cdot 10^2$ c	Висота бар'єру, В		
		№ партії зразків		
		1	2	3
4,63	3	0,74	0,73	0,75
	6	0,68	0,69	0,67
4,72	3	0,796	0,8	0,81
	6	0,85	0,84	0,855
4,8	3	0,745	0,75	0,78
	6	0,7	0,73	0,75
4,88	3	0,77	0,78	0,775
	6	0,72	0,7	0,74
5,05	3	0,73	0,72	0,725
	6	0,65	0,66	0,65
5,21	3	0,69	0,68	0,69
	6	0,63	0,64	0,65
5,38	3	0,66	0,66	0,665
	6	0,62	0,63	0,64
5,55	3	0,64	0,65	0,64
	6	0,61	0,6	0,61
5,63	3	0,63	0,635	0,64
	6	0,61	0,62	0,6



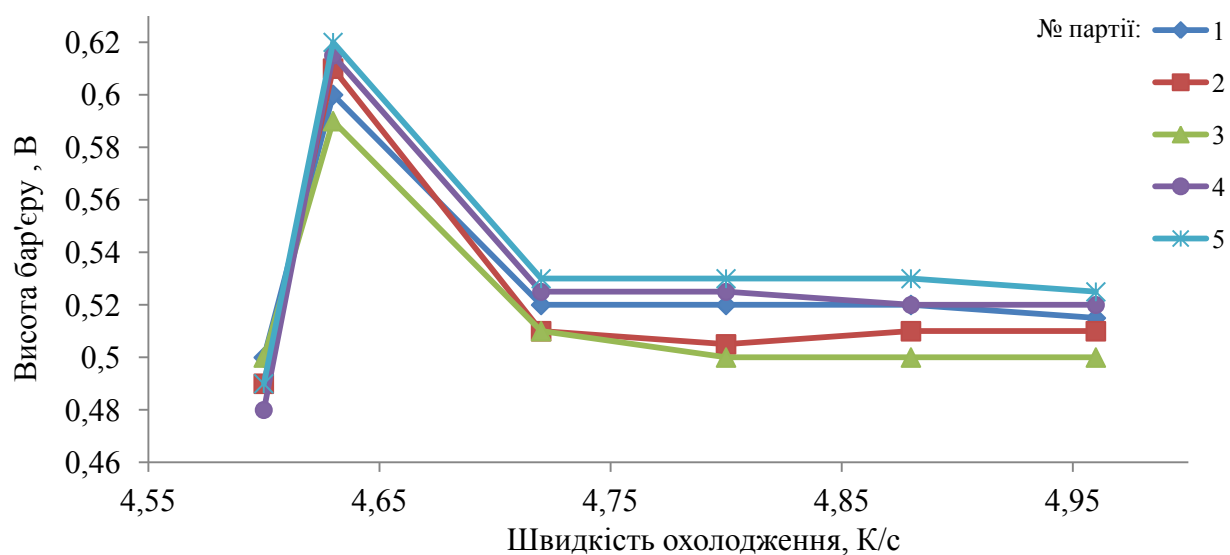
а)



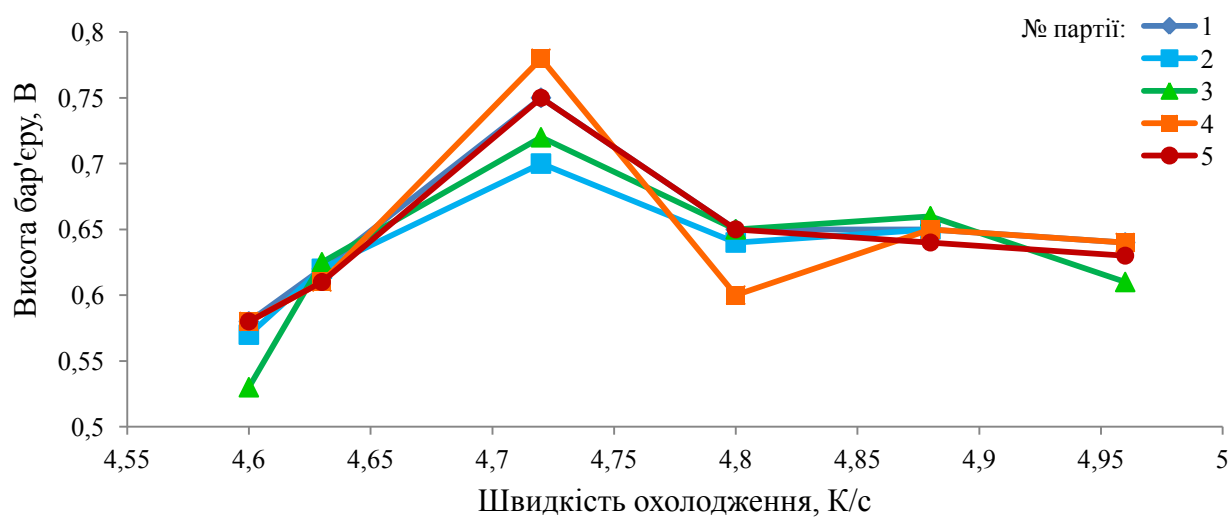
б)

Рисунок 4.3 – Залежність висоти потенційного бар'єру від швидкості підйому температури відпалу. $t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{охол}} = \text{const}$. Час відпалу: а) $3 \cdot 10^2$ с, б) $6 \cdot 10^2$ с

Досліджено (таблиця 4.4) вплив на висоту потенційного бар'єру інжектуючого переходу $\text{Ag}/n\text{-n}^+\text{GaAs}$ швидкості охолодження напиленої структури після відпалу до кімнатної температури. Рекомендована швидкість охолодження виготовленого контакту $\text{Ag}/n\text{-n}^+\text{GaAs}$ $V_{\text{охол}} = 4,72$ K/c (рисунок 4.4).



а)



б)

Рисунок 4.4 - Залежність висоти потенційного бар'єру від швидкості охолодження після відпалу. $t_{\text{відп}}$, $t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{нагр}} = \text{const}$. Час відпалу: а) $3 \cdot 10^2$ с, б) $6 \cdot 10^2$ с

Вплив температури та часу відпалу. Досліджено вплив температури та часу відпалу на висоту потенційного бар'єру $\text{Ag}/n\text{-n}^+\text{GaAs}$ у діапазоні температур 703...853 K при часі відпалу 300...600 секунд (таблиця 4.5). Найкращі значення висоти потенційного бар'єру отримані при відпалі при 803 K впродовж $6 \cdot 10^2$ секунд (рисунок 4.5).

Таблиця 4.4

Вплив швидкості охолодження температури відпалу на висоту потенційного бар'єру ($t_{\text{відп}}$, $\tau_{\text{відп}}$, $t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{нагр}}=\text{const}$)

Швидкість охолодження, К/с	Час відпалу контакту, $\cdot 10^2$ с	Висота бар'єру, В				
		№ партії зразків				
		1	2	3	4	5
4,6	3	0,5	0,49	0,5	0,48	0,49
	6	0,58	0,57	0,53	0,58	0,58
4,63	3	0,6	0,61	0,59	0,615	0,62
	6	0,62	0,62	0,625	0,61	0,61
4,72	3	0,52	0,51	0,51	0,525	0,53
	6	0,75	0,7	0,72	0,78	0,75
4,8	3	0,52	0,505	0,5	0,525	0,53
	6	0,65	0,64	0,65	0,6	0,65
4,88	3	0,52	0,51	0,5	0,52	0,53
	6	0,65	0,65	0,66	0,65	0,64
4,96	3	0,515	0,51	0,5	0,52	0,525
	6	0,64	0,6	0,61	0,64	0,63

Таблиця 4.5

Вплив температури та часу відпалу контакту на висоту потенційного бар'єру ($t_{\text{підкл}}$, $V_{\text{нагр}}$, $V_{\text{охол}}=\text{const}$)

Температура відпалу контактів, К	Висота бар'єра, В		
	№ партії зразків		
	1	2	3
703	0,7÷0,71	0,72÷0,74	0,75÷0,78
753	0,82÷0,85	0,83÷0,86	0,82÷0,87
803	0,78÷0,87	0,89÷0,91	0,92÷0,98
853	0,78÷0,85	0,83÷0,86	0,83÷0,87
Час відпалу контакту, $\cdot 10^2$ с	3	9	6

Встановлено, що висота потенційного бар'єрного переходу Ag/n-n⁺GaAs збільшується до 0,96...0,98 В при відпалі при $t_{\text{відп}}=803$ К впродовж $\tau_{\text{відп}} - 6 \cdot 10^2$ секунд.

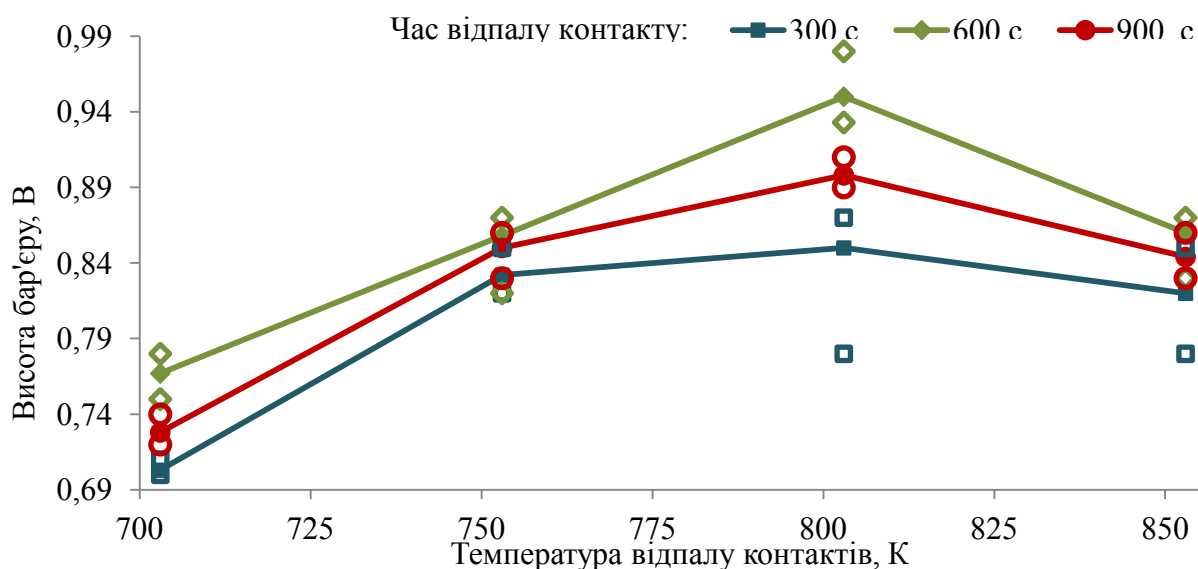


Рисунок 4.5 – Залежність висоти потенційного бар'єру від температури відпалу та часу відпалу

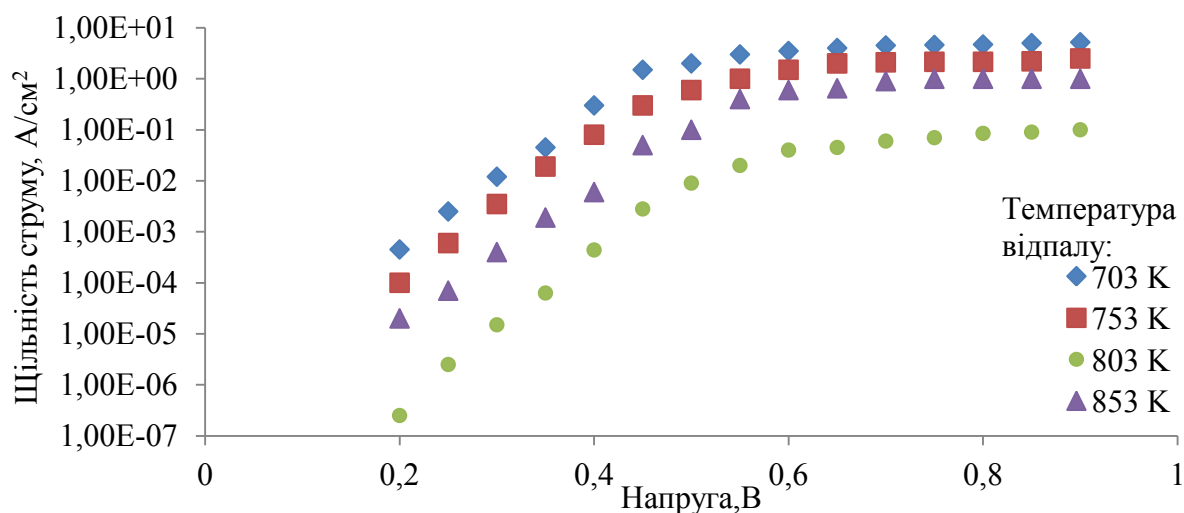


Рисунок 4.6 - Прямі вольт-амперні характеристики контактів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених при різних температурах відпалу (час відпалу $\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2$ секунд)

На рисунку 4.6 наведені експериментальні вольт-амперні характеристики у прямому напрямку контактів Ag/n-n⁺GaAs, отриманих при різних температурах відпалу ($\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2$ секунд).

Таким чином, для отримання бар'єрного переходу Ag/n-n⁺GaAs з висотою бар'єру 0,98 В рекомендований режим термообробки: температура

підкладки 393 K; температура відпалу – 803 K; час відпалу – $6 \cdot 10^2$ секунд; швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{\text{нагр}}=4,72$ K/c; $V_{\text{охол}}=4,72$ K/c.

У [141,158] показано, що плівки срібла після відпалу при оптимальному режимі, досліджені на електронному мікроскопі просвічуючого типу, мають дрібнокристалічну структуру з рівномірним розподілом однакових зерен. Розшифрування електронограми вказує, що у контактній області окрім миш'яку в плівці срібла є невелика кількість галію.

4.4 Вплив методів визначення параметрів бар'єрного переходу на їх точність

Відомі кілька методів визначення висоти потенційного бар'єру ϕ_B [33,50,51,68,66]. Одним з них є метод визначення ϕ_B за прямими гілками вольт-амперних характеристик [33].

Реальні вольт-амперні характеристики бар'єрних переходів метал-напівпровідник залежать від технології їх виготовлення. Але точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти потенційного бар'єру ϕ_B і фактору неідеальності η) залежить не тільки від точності вимірювання струму і напруги, але й від методу їх визначення.

Для напівпровідників з великою рухливістю, у яких довжина вільного пробігу носіїв струму значно перевищує товщину запірного шару, дифузна теорія випрямлення не підходить, оскільки запірний шар у таких напівпровідниках «прострілюється» носіями [37].

Родерік [46,47] зробив припущення, що в діодах Шотткі на напівпровідниках з високою рухливістю носіїв заряду струм в прямому напрямі пов'язаний з термоелектронною емісією. Для низького рівня легування при термоелектронній емісії опір контакту R_c не залежить від N_D . Для сильнолегованих напівпровідників переважає польова емісія $\ln R_c \sim N_D^{-1/2}$.

У роботі [65] представлено чисельну модель інжектуючого бар'єрного переходу, що враховує процеси струмопереносу крізь П-подібний потенційний бар'єр на межі матеріалів. У результаті розрахункових експериментів [65] при моделюванні отримана вольт-амперна характеристика інжектуючого бар'єрного переходу метал-GaAs (рисунк 4.7).

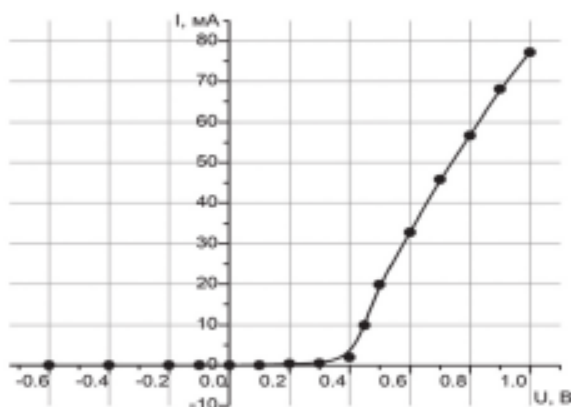


Рисунок 4.7 – Змодельована [65] ВАХ інжектуючого бар'єрного переходу метал-GaAs

Встановлено, що розміри збідненої області та потенційний бар'єр для електронів зменшуються при зміні напруги від -0,4 В до 0,4 В. В діапазоні цих напруг струм крізь бар'єр інжектуючого бар'єрного переходу метал-GaAs (бар'єр Шотткі) нульовий – контакт замкнений. Струм, відмінний від нуля з'являється при напрузі 0,4 В.

При аналізі ВАХ тонкоплівкових структур з бар'єром Шотткі припускалося, що в початкових структурах механізм переносу носіїв заряду при концентрації вільних носіїв в GaAs $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ визначається термоелектронною емісією (Т-емісією).

Розглянуті і апробовані методи визначення висоти бар'єра Шотткі за вольт-амперними характеристиками на прикладі бар'єрних переходів Ag/n- p^+ GaAs, виготовлених при різних режимах термообробки.

4.4.1 Висота інжектуючого бар'єрного переходу та фактор неідеальності

Критерієм оцінки якості бар'єру є його висота ϕ_{Bn} , яка визначалася у даній роботі за методом вольт-амперних характеристик [36,51,52]:

У Sze S. M. висота бар'єру визначається згідно формули [33]:

$$\phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^{**} T^2}{I_s} \right),$$

де k - стала Больцмана, Дж/град; T - температура оточуючого середовища, К; q - заряд електрона, Кл; A^{**} - ефективна стала Річардсона, $A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$. За даними [33] для GaAs $A^{**} = 120 A \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, I_s - щільність струму термоемісії, ($A/\text{см}^2$) при $V=0$.

Величина ϕ_{Bn} не надто чутлива до вибору A^{**} , наприклад, при кімнатній температурі збільшення A^{**} на 100% викликає збільшення ϕ_{Bn} на 0,018 В [33]. Екстраполяційна величина щільності струму при нульовій напрузі дає струм насичення I_s [33]. На рисунку 4.8 наведений приклад визначення струму насичення за допомогою метода екстраполяції.

Значення струму насичення бар'єру Шотткі з вольт-амперної характеристики у зворотному напрямку важко визначити через вплив поверхневих струмів, впливу сил дзеркального зображення й крайових ефектів [67-70,143,144].

На рисунку 4.9 представлено експериментальні ВАХ контактів Ag/n- p^+GaAs і визначені щільності струму насичення за допомогою лінійної екстраполяції (метод, запропонований Sze S. M. у [33]).

ϕ_{Bn} діодів Шотткі визначає втрати при перетворенні [52,145-147], а також величину струму в прямому напрямку.

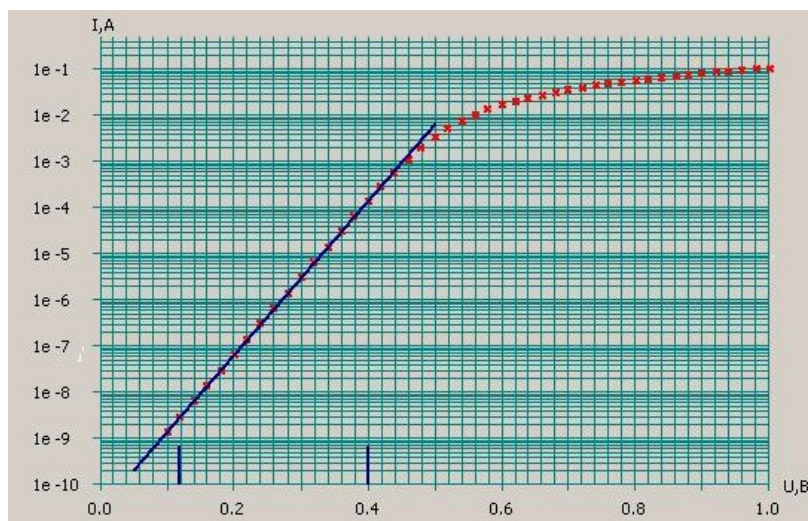


Рисунок 4.8 – Приклад визначення струму насичення за прямими гілками вольт-амперної характеристики за допомогою метода екстраполяції

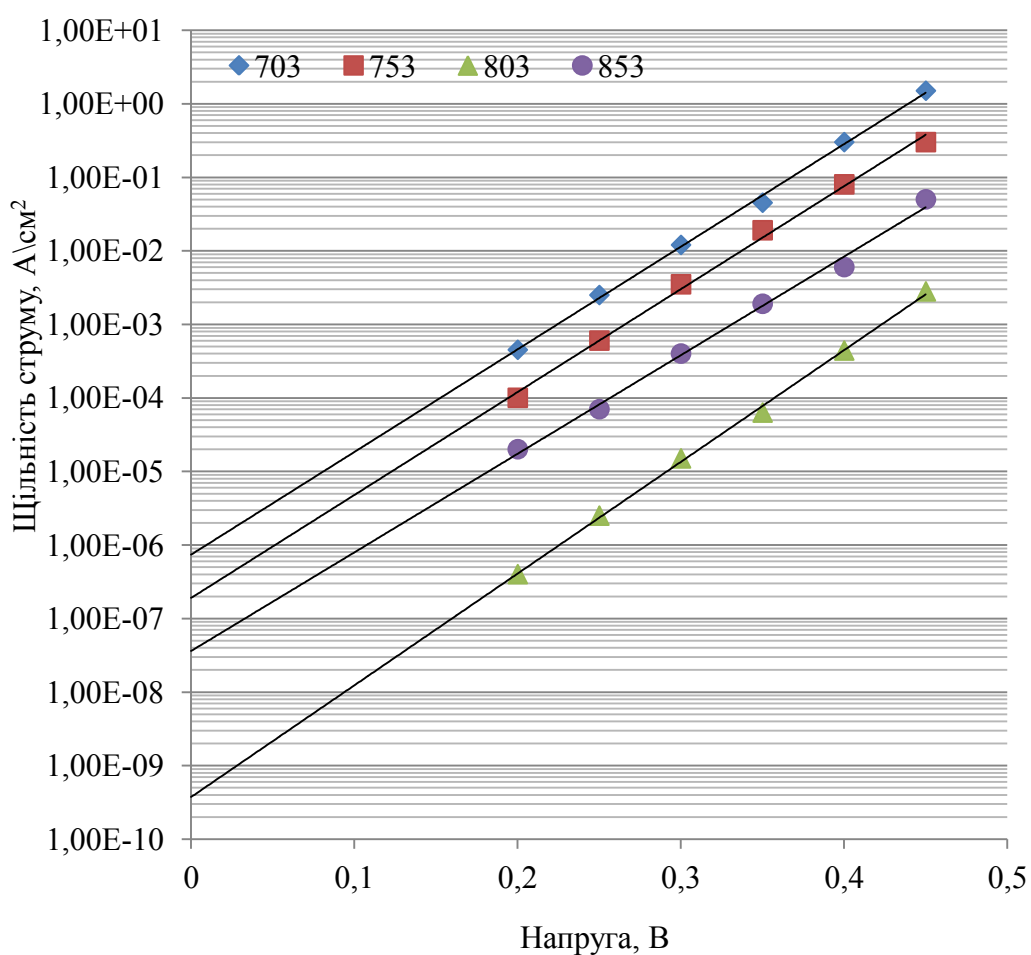


Рисунок 4.9 – Визначення щільності струму насичення методом лінійної екстраполяції за ВАХ контактів Ag/n-n⁺GaAs

На рисунок 4.10 видно, що зі збільшенням висоти бар'єру знижується щільність струму

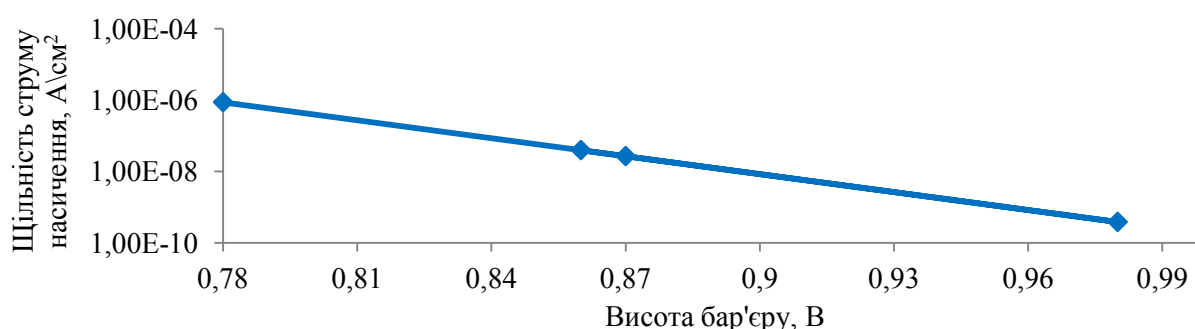


Рисунок 4.10 – Залежність щільності струму від висоти потенційного бар'єру при $T=300$ К та $A^{**}=120$ А·см⁻²·К⁻² (для партії зразків 1...4)

Фактор неідеальності η визначається згідно методу вольт-амперної характеристики при прямому зміщенні (рисунок 4.9) за формулою, запропонованою Sze S. M. [33]

$$\eta \equiv (q/(kT)) \cdot \partial V / (\partial (\ln j)),$$

з якої видно, що фактор неідеальності зростає зі зменшенням струму, тобто зі збільшенням висоти бар'єру (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6

Визначення фактору неідеальності (згідно з Sze S. M.)

№ партії	$t_{\text{відп}}, \text{ К}$	η	$\phi_{\text{Вп}}, \text{ В}$
1	703	1,176	0,78
2	753	1,176	0,87
3	803	1,276	0,98
4	853	1,142	0,86

У [52] розглянуті методи та встановлені діапазони застосування, а також точності визначення параметрів бар'єру Шотткі (БШ) до широкозонних

напівпровідників за результатами вимірювань вольт-амперних характеристик.

Rhoderick E. H., Williams R. H. [51] представили вольт-амперну характеристику з урахуванням параметрів, що описують стаціонарну ВАХ (висоти бар'єру Шотткі ϕ_B , фактору неідеальності η , послідовного R_s та шунтуючого R_p опорів), у вигляді:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/nkT) [1 - \exp(-qV/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (4.1)$$

де $V_{pn} = V - IR_s$ – напруга на переході метал-напівпровідник.

У [52] були визначені умови, при яких:

- внесок послідовного R_s та шунтуючого R_p опорів дуже малий (менше 1%) і ними можна знехтувати: обмеження зверху $IR_s/V_{pn} < 10^{-2}$, $\Delta V/V$ відносна похибка прикладеної напруги, та обмеження знизу $nkT/(qIR_p) \cdot (\ln(I/I_0) - 1) > 10^2$;

- внесок бар'єру Шотткі на фоні цих опорів значний (для досягнення похибки менше 1% на фоні похибки вимірювання): обмеження зверху $IR_s/V_{pn} < V/100\Delta V$ та обмеження знизу $nkT/(qIR_p) \cdot (\ln(I/I_0) - 1) > 100\Delta V/V$.

Якщо на ВАХ відсутні ділянки, обмежені цими умовами, то вона не дає інформації про коефіцієнт неідеальності та висоту бар'єру.

У [52] показано, що найбільш простим у реалізації є метод розрахунку параметрів ВАХ згідно Rhoderick E.H [51], де після побудови ВАХ у координатах $\ln(I)/[1 - \exp(-qV/kT)] \propto V$, проведення апроксимації прямої лінійної ділянки $y = a + bx$, отримують коефіцієнти $b = \ln(I_0)$ й $a = q/nkT$, розраховують ϕ_B та η . Недолік методу [51] - відсутність врахування послідовного опору, завдяки чому можуть виникати додаткові помилки при визначенні ділянки ВАХ, де цим впливом нехтують.

У [148-150,152] для розрахунку параметрів БШ розглянутий метод прямої апроксимації усієї довжини вольт-амперної характеристики (the direct approximation method), описаний у формулі (4.1), недоліком якого є складні розрахунки. У [52,154,155] запропоновано програму IVbarrierCalc2, яка

полегшує цей процес.

У дисертаційній роботі при визначенні параметрів ϕ_{Bn} , η , R_s за ВАХ за методом прямої апроксимації (direct approximation) та за методом Rhoderick використано програму для автоматизованого розрахунку IVbarrierCalc2 [155].

На рисунку 4.11 представлені експериментальні ВАХ інжектуючих контактів, отриманих при різних температурах відпалу (партії зразків № 1-4).

Результати автоматизованого розрахунку для двох методів (Rhoderick Е.Н. та direct approximation) наведені у таблиці 4.7.

Причиною збільшення помилки розрахунку висоти бар'єру в обох методах є зменшення протяжності логарифмічної ділянки ВАХ та підвищення складності визначення його меж.

Williams R.H. [51,153] розробив рекомбінаційну модель струму, у якій для переходів метал-напівпровідник з висотою потенційного бар'єру $\phi_B > 0,5E_g$ фактор неідеальності дорівнює:

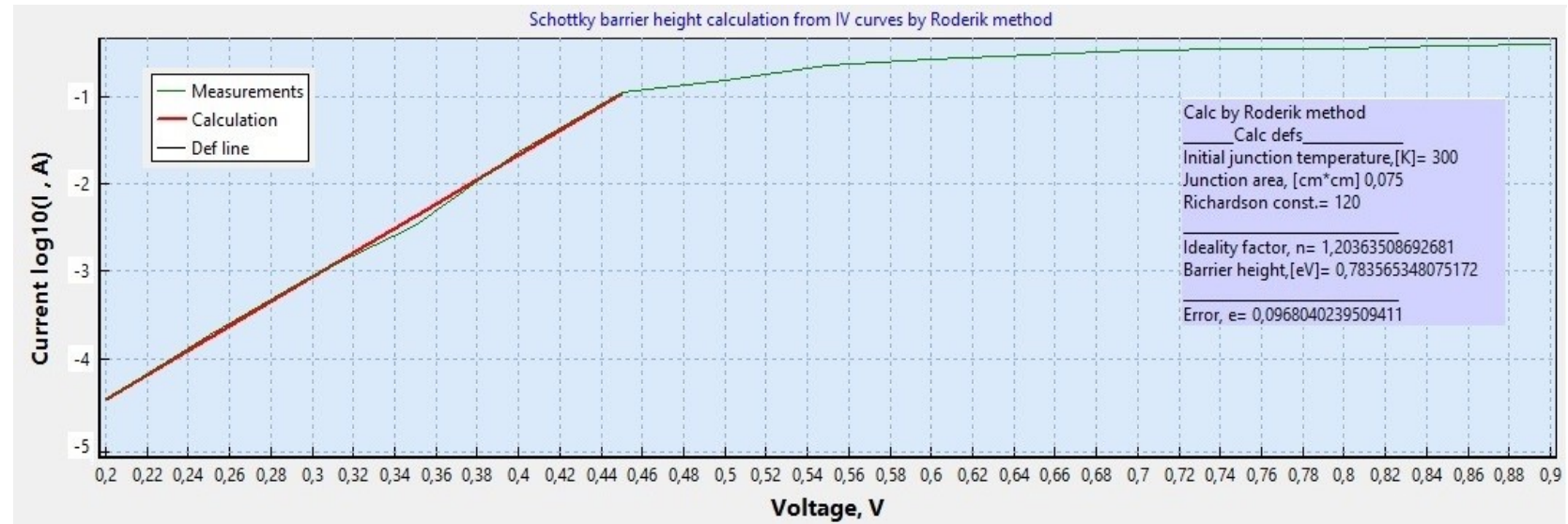
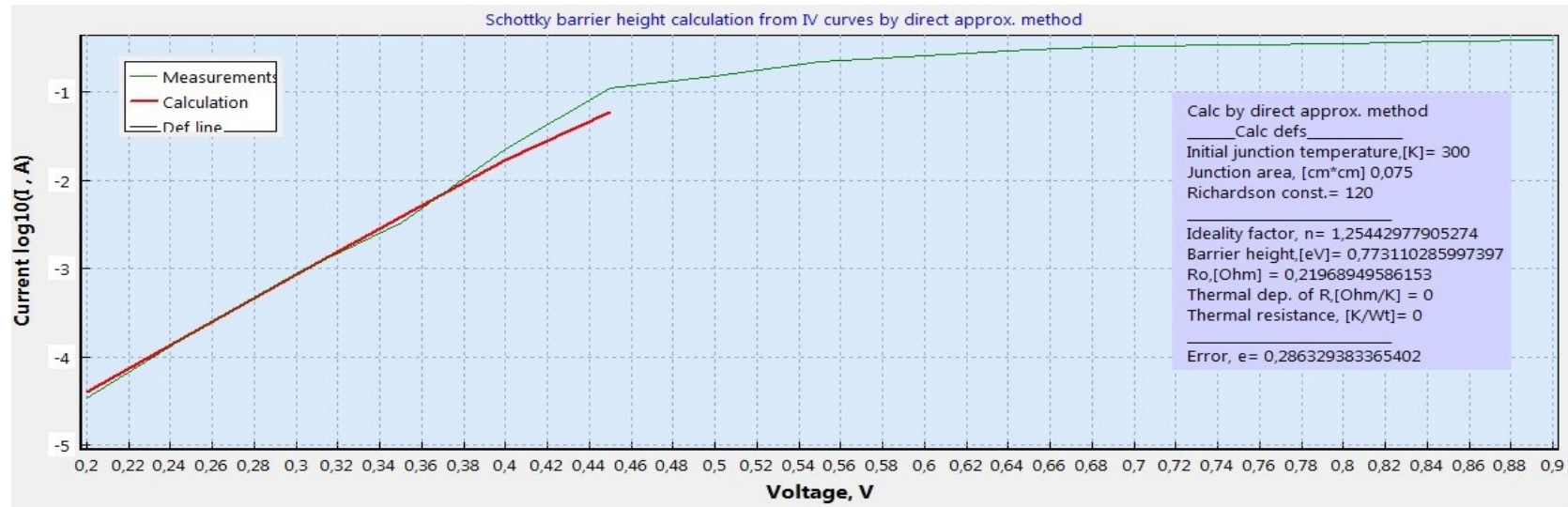
$$\eta = \phi_B / 0,5E_g,$$

де E_g – ширина забороненої зони напівпровідника.

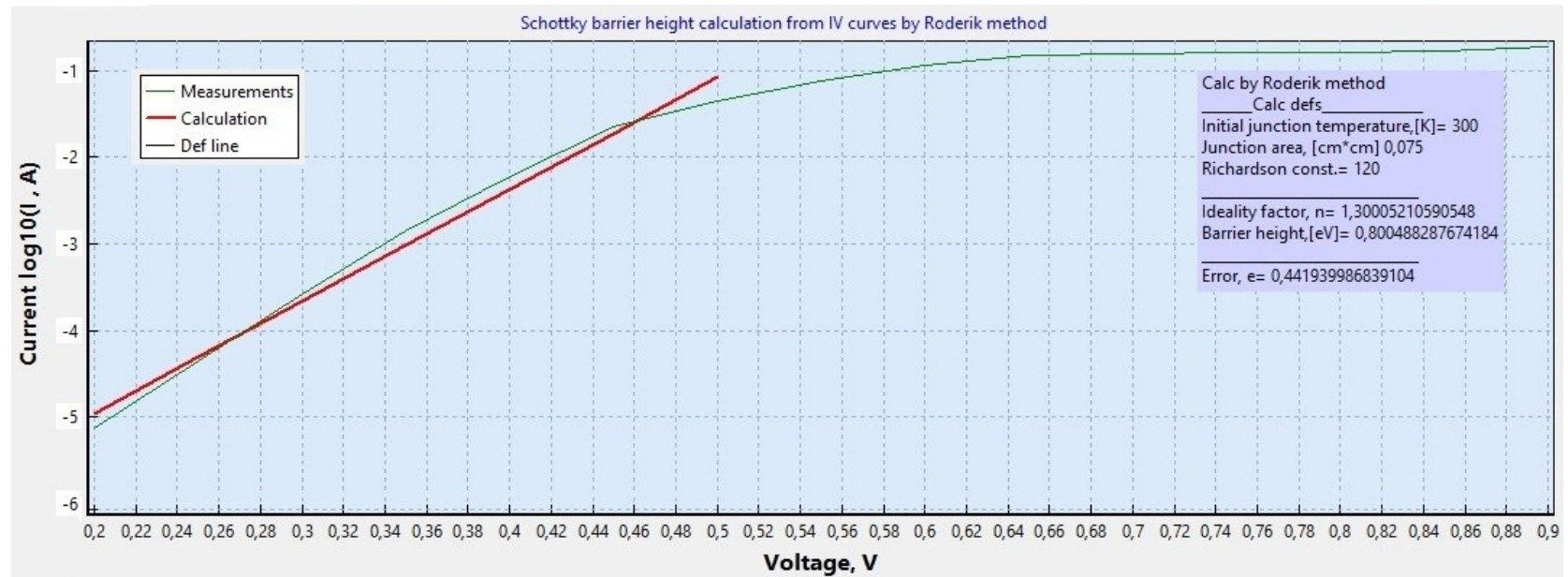
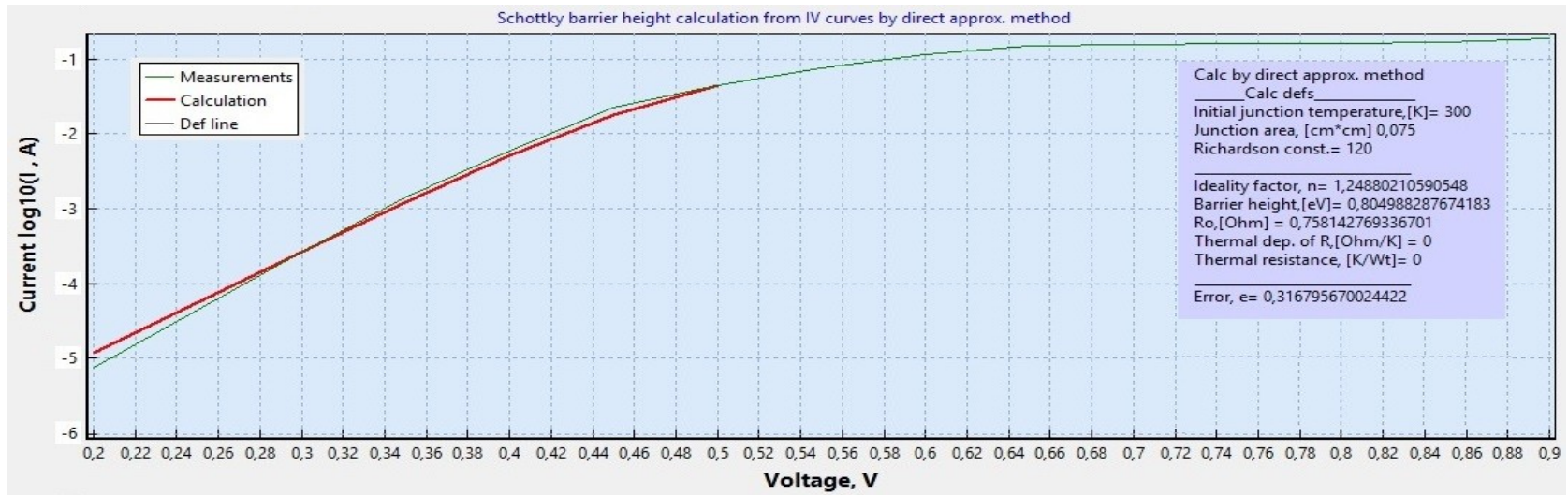
Таблиця 4.7

Результати автоматизованого розрахунку параметрів бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs за методом direct approximation та за методом Rhoderick

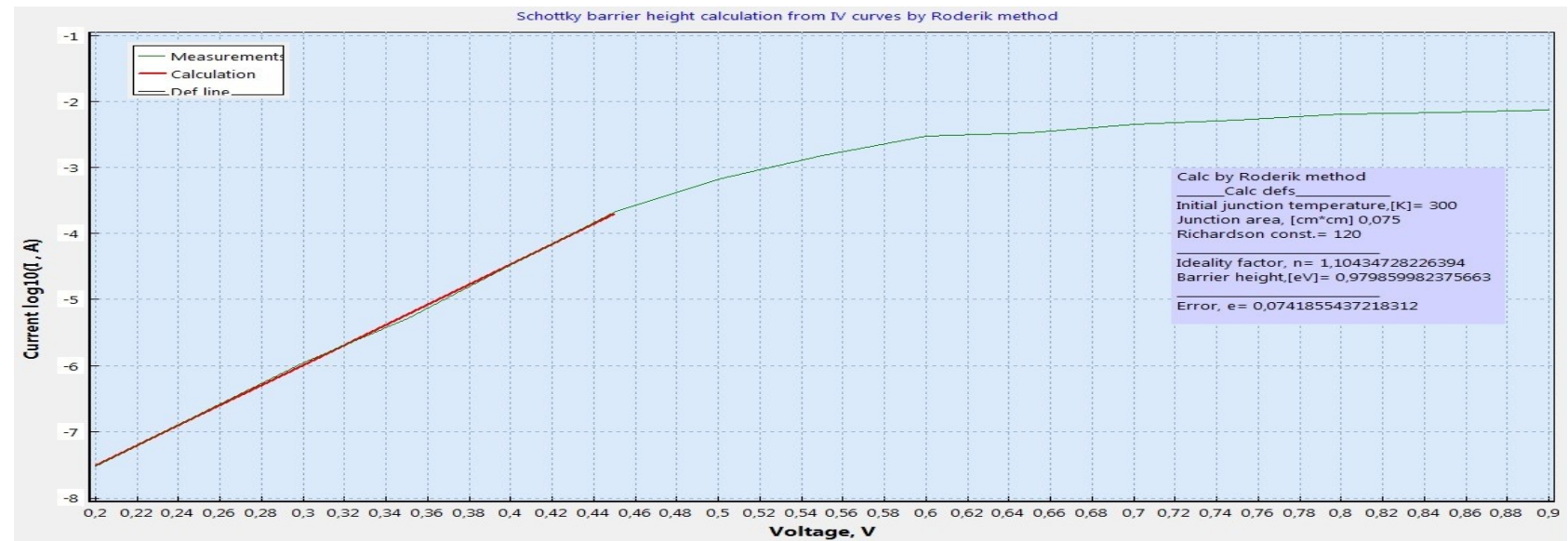
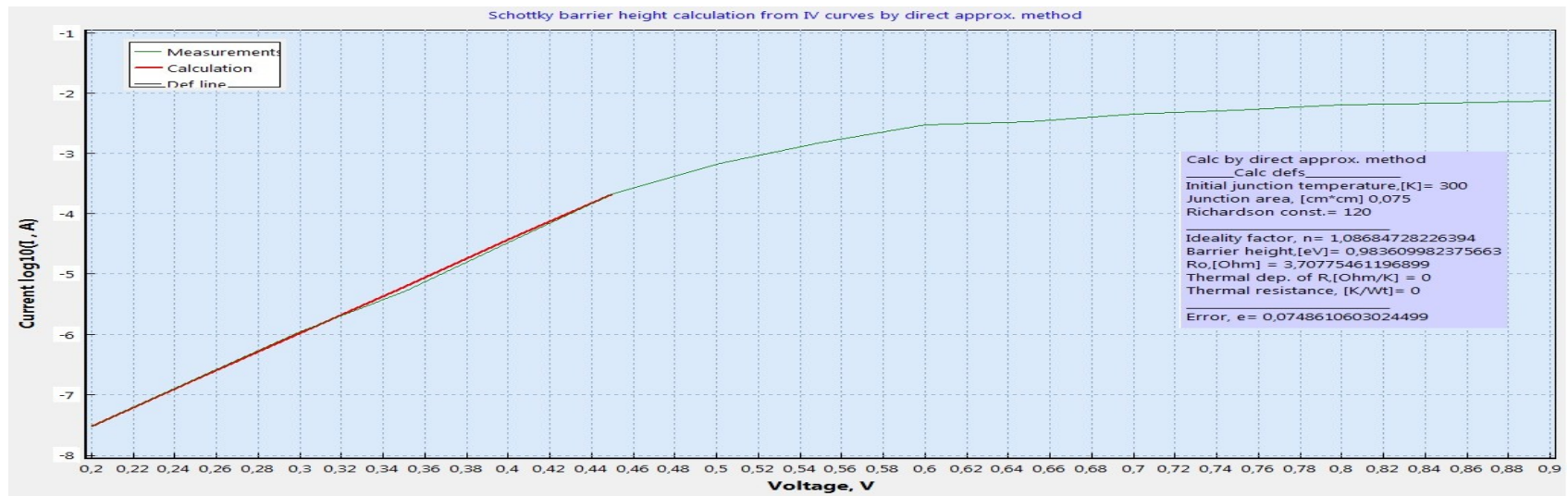
$t_{відп}, K$	Метод розрахунку	η	ϕ_{Bn}, B	$R_s, Ом$	e
703	direct approx.	1,254	0,773	0,22	0,286
	Rhoderick	1,204	0,784	-	0,097
753	direct approx.	1,249	0,805	0,758	0,317
	Rhoderick	1,3	0,80	-	0,441
803	direct approx.	1,087	0,984	3,708	0,0749
	Rhoderick	1,104	0,98		0,074
853	direct approx.	1,3288	0,849	1,026	0,302
	Rhoderick	1,339	0,847	-	0,291



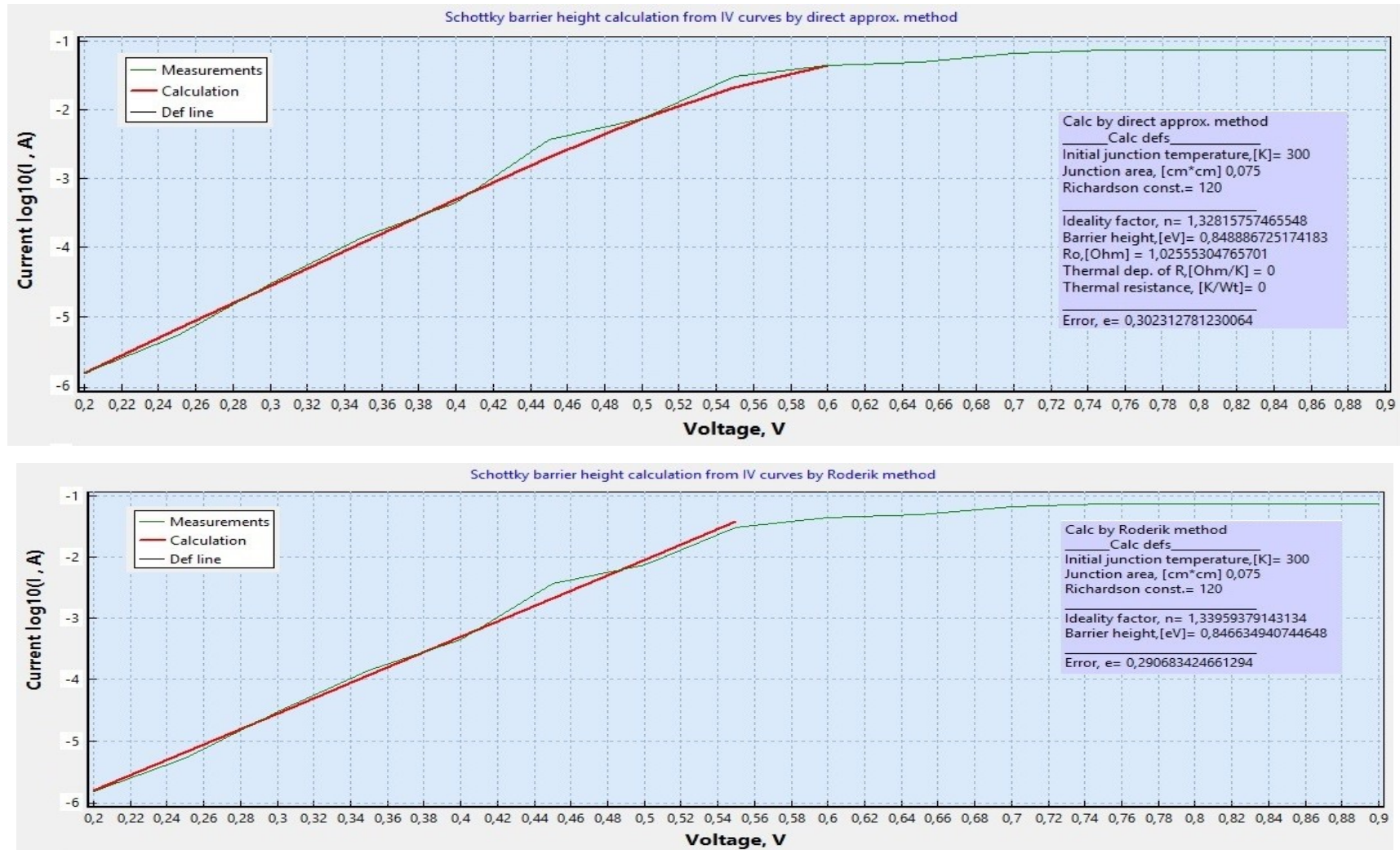
а) партія зразків № 1 ($t_{\text{відп}}=703 \text{ K}$)



б) партія зразків № 2 ($t_{\text{відп}}=753 \text{ K}$)



в) партія зразків № 3 ($t_{\text{відп}} = 803 \text{ K}$)



г) партія зразків № 4 ($t_{\text{відп}}=853 \text{ K}$)

Рисунок 4.11 – Результати автоматизованого розрахунку параметрів інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs за ВАХ ($\tau_{\text{відп}}=6 \cdot 10^2$ секунд)

За результатами розрахунків згідно Williams R.H. було визначено, що для бар'єру Шотткі Ag/n-n⁺GaAs при $\phi_{\text{Вп}}=0,8\ldots0,95$ В, $N_D=10^{16}$ см⁻³, $E_{\text{g GaAs}}=1,424$ еВ і температурі 300 К фактор неідеальності η змінюється відповідно від $\eta=1,13$ до $\eta=1,34$ (рисунок 4.12), що не суперечить моделі Williams R.H. [31].

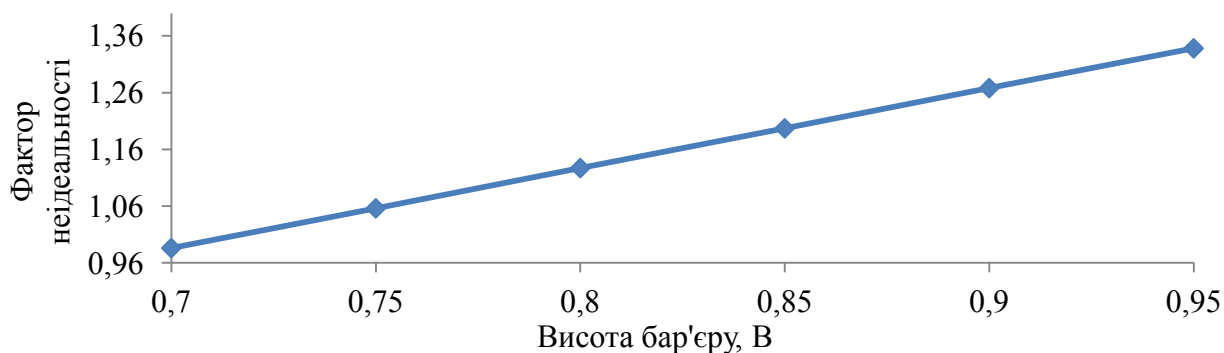


Рисунок 4.12 – Залежність фактору неідеальності від висоти бар'єру (згідно з Williams R.H.), $N_D=10^{16}$ см⁻³

Таблиця 4.8

Визначення фактору неідеальності (згідно з Williams R.H)

№ партії	1	2	3	4
$t_{\text{відп}}, \text{ К}$	703	753	803	853
$\phi_{\text{Вп}}, \text{ В}$	0,78	0,87	0,98	0,86
η	1,095	1,22	1,376	1,207

Розрахунки показують, що для нижчої концентрації носіїв ($N_D=10^{15}$ см⁻³) фактор неідеальності близький до одиниці, що теж підтверджує припущення Williams R.H. [31].

У ряді першоджерел [30,32,37] також зазначено, що фактор неідеальності η при низькому рівні легування ($N_D=10^{15}$ см⁻³) і температурі 300 К близький до 1, але при зростанні рівня легування ($N_D=10^{16}$ см⁻³) відмінність η від одиниці стає суттєвою.

Таблиця 4.9

Параметри бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, розраховані за ВАХ різними методами

№ партії	t _{відп} , К	Метод розрахунку	η	φ _{Вн} , В	R _s , Ом
1	703	direct approx.	1,254	0,773	0,22
		Rhoderick	1,204	0,784	-
		Williams	1,095	0,78	-
		Sze	1,176	0,78	-
2	753	direct approx.	1,249	0,805	0,76
		Rhoderick.	1,3	0,8	-
		Williams	1,22	0,87	-
		Sze	1,176	0,87	-
3	803	direct approx.	1,087	0,984	3,7
		Rhoderick	1,104	0,98	-
		Williams	1,376	0,98	-
		Sze	1,276	0,98	-
4	853	direct approx.	1,328	0,849	1,03
		Rhoderick	1,34	0,847	-
		Williams	1,207	0,86	-
		Sze	1,142	0,86	-

Значення автоматизованого розрахунку за методами direct approximation та Rhoderick, округлені до 3-го знаку (таблиця 4.7), дані розрахунку параметрів за методом Sze (таблиця 4.6) і результати розрахунків за методом Williams (таблиця 4.8) для бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs представлені у таблиці 4.9.

Порівняльний аналіз отриманих значень фактору неідеальності (таблиця 4.9), розрахованого за ВАХ різними методами, показав, що для інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs (111) з N_D=10¹⁶ см⁻³, створених при рекомендованому способі термічної обробки (t_{відп}=803 К, τ_{відп}=6·10² секунд, φ_{Вн}=0,98 В), найменше значення η=1,087 отримані у методі розрахунку direct approximation, найбільше η=1,376 у методі розрахунку Williams.

Дослідження вказують, що для визначення висоти потенційного бар'єру при невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ метод direct

approximation найбільш точним, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що висота бар'єру ϕ_{Bn} , яка визначається за ВАХ, є чутливою до напруги. Нелінійний характер залежності ϕ_{Bn} від прикладеної напруги з'являється у області зміщень, обмежених ділянкою між 0,44...074 В, що призводить відповідно й до зміни фактору неідеальності η .

Припускається, що відхилення ВАХ від ідеальної виникають завдяки генераційно-рекомбінаційному струму. Отримати близьки до ідеальних ВАХ можливо ретельним очищенням поверхні та підбором оптимального температурного режиму відпалу, який впливає на проміжний шар контакту.

У реальних контактах у випадку з окисним шаром, згідно запропонованої моделі (п. 1.2), можуть мати важливе значення повільні поверхневі стани, які можуть екранувати об'єм напівпровідника від прикладеного поля. При цьому основна частина падіння напруги відбувається у окисному шарі. За такої напруги коефіцієнт неідеальності зростає, ВАХ відхиляється від ідеальної, а контакт більше не є випрямляючим.

4.5 Коефіцієнт інжекції γ інжектуючого бар'єрного переходу $Ag/n-n^+GaAs$

При низькому рівні інжекції перенос заряду в діодах Шотткі здійснюється головним чином основними носіями [28,34,40,44-47,149,150]. Але при достатньо великих прямих зміщеннях коефіцієнт інжекції неосновних носіїв γ (тобто відношення струму неосновних носіїв до повного струму) зростає зі збільшенням струму. Припускається, що зростає дрейфова компонента струму, яка переважає дифузійну [33]:

$$J_p = q\mu_p p_n E - qD_p \frac{dp_n}{dx}.$$

Встановлено [33], що при низькому рівні інжекції можливо знехтувати дрейфовим членом у порівнянні з дифузійним. У результаті для визначення коефіцієнта інжекції γ запропонований [33] вираз:

$$\gamma \equiv \frac{J_p}{J_p + J_n} \simeq \frac{J_p}{J_n} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p A^{**} T^2 \exp(-q\phi_{Bn}/kT)}.$$

де N_D – концентрація донорів, см^{-3} ; D_p – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв, $\text{см}^2/\text{с}$; L_p – дифузійна довжина неосновних носіїв, см ; n_i – власна концентрація носіїв, см^{-3} .

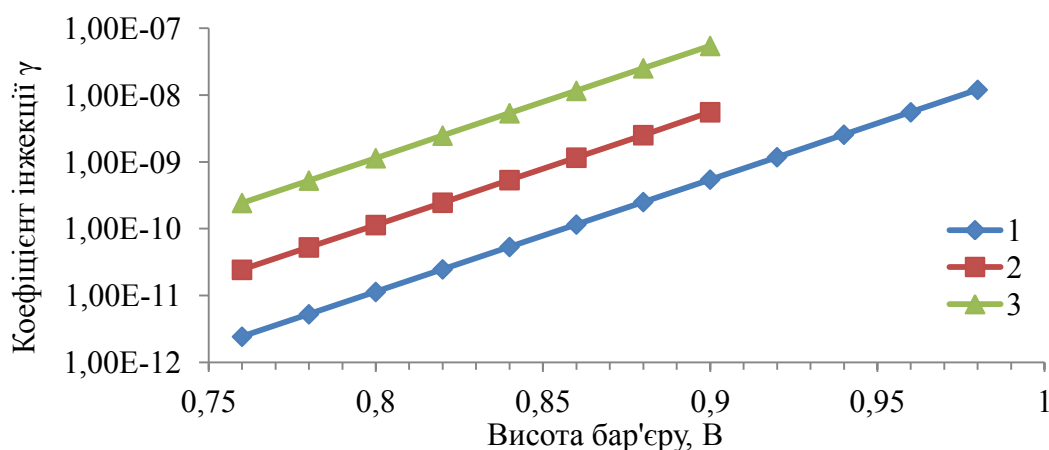
При $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ і $\phi_{Bn} = 0,8 \text{ В}$ коефіцієнт інжекції дуже малий ($\gamma = 10^{-11}$). Для порівняння для бар'єрів Au-Si [40] при $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ і $\phi_{Bn} = 0,8 \text{ В}$ $\gamma = 10^{-4}$. Рівень інжекції для різних контактів змінюється у межах 4-10%.

На рисунку 4.13 показана залежність коефіцієнту інжекції у бар'єрах Ag/n-GaAs (111) від висоти потенційного бар'єру при концентрації неосновних носіїв у епітаксійному шарі $N_D = (10^{14} \dots 10^{16}) \text{ см}^{-3}$.

Проведені розрахунки дозволили встановити, що у зразках з більшою концентрацією донорів коефіцієнт інжекції зменшується (таблиця 4.10).

Розрахунки показали, що для зменшення коефіцієнта інжекції γ необхідно брати зразки:

- з більшою концентрацією донорів N_D (таблиця 4.10), що відповідає низькому опору;
- з малою концентрацією n_i (для порівняння при $n_{iSi} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $\gamma_{Au-Si} = 10^{-4}$, при $n_{iGaAs} = 1,79 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, $\gamma_{Ag/n-GaAs} \sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$), яка відповідає більший ширині забороненої зони;
- більшим значенням щільності струму насичення I_s (що відповідає малій висоті бар'єру).



1 - $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 - $N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3 - $N_D=10^{14} \text{ см}^{-3}$

Рисунок 4.13 - Вплив висоти потенційного бар'єру на величину коефіцієнту інжекції у бар'єрах Ag/n-n⁺GaAs

Розраховані значення коефіцієнта інжекції γ для бар'єрів Шотткі Ag/n-n⁺GaAs ($N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ і $\phi_{\text{Вн}}=0,78 \text{ В} \dots 0,98 \text{ В}$) змінюються у діапазоні $5,28 \cdot 10^{-12} \dots 1,2 \cdot 10^{-8}$, тобто мають дуже маленькі значення, тому інжекцією дірок можна знехтувати. Це є причиною того, що діоди Шотткі називають приладами з основними носіями заряду.

Таблиця 4.10

Результати розрахунків γ для бар'єрів Ag/n-n⁺GaAs

$\phi_{\text{Вн}}, \text{ В}$	γ		
	$N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$	$N_D=10^{14} \text{ см}^{-3}$
0,76	$2,44 \cdot 10^{-12}$	$2,44 \cdot 10^{-11}$	$2,44 \cdot 10^{-10}$
0,78	$5,28 \cdot 10^{-12}$	$5,28 \cdot 10^{-11}$	$5,28 \cdot 10^{-10}$
0,80	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$1,14 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-9}$
0,82	$2,48 \cdot 10^{-11}$	$2,46 \cdot 10^{-10}$	$2,48 \cdot 10^{-9}$
0,84	$5,36 \cdot 10^{-11}$	$5,36 \cdot 10^{-10}$	$5,36 \cdot 10^{-9}$
0,86	$1,16 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-8}$
0,88	$2,52 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-8}$
0,90	$5,45 \cdot 10^{-10}$	$5,55 \cdot 10^{-9}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$
0,92	$1,18 \cdot 10^{-9}$	-	-
0,94	$2,56 \cdot 10^{-9}$		
0,96	$5,54 \cdot 10^{-9}$		
0,98	$1,2 \cdot 10^{-8}$		

Висновки до розділу 4

1. Експериментально досліджено залежність параметрів та характеристик інжектуючих бар'єрних переходів Ag до n-n⁺GaAs від технології виготовлення методом вакуумного випаровування. Визначено оптимальні режими нанесення та формування інжектуючих бар'єрних переходів з характеристиками, близькими до ідеальних ($\eta=1,087$).

2. Розроблено режим термообробки у вакуумі бар'єрних переходів, який дозволяє збільшити висоту бар'єру Шотткі $\phi_{\text{Вп}}$ до 0,98 В і зменшити коефіцієнт інжекції γ до 10^{-8} :

- температура підкладки під час напилення 393 К,
- температурі відпалу 803 К, час відпалу $6 \cdot 10^2$ секунд,
- швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{\text{нагр}}=4,72$ К/с; $V_{\text{охол}}=4,72$ К/с.

3. На основі експериментальних досліджень встановлено, що висота бар'єру $\phi_{\text{Вп}}$, яка визначається за ВАХ, є чутливою до напруги. Нелінійний характер вольт-амперної характеристики інжектуючих бар'єрних переходів Ag до n-n⁺GaAs виявляється у області зміщень, обмеженій ділянкою між 0,44...0,74 В, що призводить відповідно й до зміни фактору неідеальності η .

4. Встановлено, що точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти бар'єру $\phi_{\text{В}}$ і фактору неідеальності η) залежить не тільки від точності вимірювання струму і напруги, але й від методу їх визначення. Показано, що для бар'єру Шотткі Ag/n-n⁺GaAs з $\phi_{\text{Вп}}=0,98$ В при температурі 300 К фактор неідеальності змінюється від $\eta=1,087$ до $\eta=1,376$ за результатами розрахунків за ВАХ чотирма різними методами.

5. При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру та фактору неідеальності проведення розрахунків за методом direct approximation є найбільш точним, оскільки цей метод враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

Довірчий інтервал для контактів, створених при рекомендованому режимі: $P(95\%) = 9,38 \cdot 10^{-1} \div 9,48 \cdot 10^{-1}$, для $P(99\%)$ $9,36 \cdot 10^{-1} \div 9,50 \cdot 10^{-1}$.

Математична обробка результатів досліджень параметрів Ag/n-n⁺GaAs та похибок вимірювання у пакеті програм Excel наведена у додатку Б.

На розроблений спосіб виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів до GaAs отримано Патент України на корисну модель № 119116 (2017 р.) [158].

Результати даного розділу опубліковано у роботах [84,108,156-163].

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТОНКОПЛІВКОВОГО МЕП-ПРИЛАДУ З БАР'ЄРАМИ ШОТТКІ

Вимоги до якості функцій, які виконують НВЧ прилади на основі арсеніду галію, диктують необхідність глибокого дослідження впливу різних чинників на їх основні характеристики та параметри. Пристрої на хвилях просторового заряду (ХПЗ) у тонкоплівкових напівпровідникових структурах (ТНС) з негативною диференційною провідністю (НДП), обумовленою міждолинними електронними переходами у напівпровідниках типу n-GaAs, заслуговують уваги завдяки широким функціональним можливостям [33,167-168]. У порівнянні з аналогічними функціональними можливостями акустoeлектронних пристроїв такі пристрої суттєво перевершують їх по робочих частотах [169]. Найбільш відомим функціональним пристроєм на хвилях просторового заряду у напівпровідниках є тонкоплівковий підсилювач біжучої хвилі на n-GaAs [4,170-172].

При практичному конструюванні функціональних пристроїв на хвилях просторового заряду (ХПЗ) на робочі частоти, які наближуються до граничної частоти підсилюючих пристроїв ХПЗ, особливе значення має вибір оптимальних електрофізичних параметрів і характеристик активного шару ТНС – напівпровідникової плівки n-GaAs. До таких параметрів відноситься концентрація електронів n_0 , яка визначається рівнем легування напівпровідника.

У роботах [167-169] показано, що оптимальний рівень легування плівки для створення найбільш високочастотних функціональних пристроїв, працюючих на хвилях просторового заряду, знаходиться в інтервалі від 10^{15} до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При розрахунках враховувалося [168], що за літературними даними існує розкид у таких важливих параметрах для арсеніду галію, як

діелектрична проникність $\epsilon=12,9\ldots13,1$, швидкість електронів $v_0=10^7$ см/с у полі $E_0=5,5$ кВ/см, коефіцієнт дифузії $D=200\ldots400$ см²/с.

Більш перспективним є використання в ІС приладів з міждолинним електронним переходом (МЕП-приладів) з керуючими електродами - бар'єрами Шотткі, які не вимагають застосування циркулятора, забезпечують достатню розв'язку між входом і виходом, а також дозволяють досягти коефіцієнта підсилення до 40 дБ і вище. У МЕП-приладах з бар'єрами Шотткі підсилення здійснюється наростанням хвиль об'ємного заряду [33,166,170-172]. Вхідний сигнал збуджує хвилю об'ємного заряду у катода. При розповсюдженні у зразку хвиля об'ємного заряду наростає. Завдяки цьому вихідний сигнал, який наростаюча хвиля збуджує у анода, буде підсиленням.

Швидкодія МЕП-приладів [33,166, 171-176] у значній мірі визначається часом затримки сигналу, пов'язаним з процесом встановлення у них коливальних. Співвідношення, які визначають закономірності нарощування у МЕП-приладах НВЧ коливальних і пов'язують час встановлення коливальних з параметрами МЕП-приладів і режимами їх роботи у відомих першоджерелах [33,166,171-176] відсутні.

5.1 Спрощена математична модель МЕП-приладу з бар'єрами Шотткі

З урахуванням перспективності використання в пристроях цифрової та аналогової техніки МЕП-приладів з бар'єрами Шотткі типу транзисторів біжучої хвилі (ТБХ) [33,166,171-174] визначимо закономірності нарощування НВЧ коливальних та їх час встановлення у цих приладах.

Для спрощення математичної моделі МЕП-приладів будемо вважати, що носії розподілені рівномірно у епітаксійному шарі робочої області приладів, а їх рекомбінацією можна знехтувати. Таке припущення добре виконується

при відсутності (або при незначному надлишку у порівнянні з основними носіями) неосновних носіїв заряду у високоякісному однолегованому бездефектному напівпровіднику з малою кількістю сторонніх атомів як в об'ємі, так і на його поверхні.

Рівняння енергетичного балансу для МЕП-приладів типу ТБХ (рисунок 5.1 [170-172]) з урахуванням витрат енергії у корисному навантаженні $P_{\text{вих}}$ може бути записано таким чином [173]:

$$P_e + P_{\text{вх}} = P_3 + P_{\text{п}} + P_{\text{вих}}, \quad (5.1)$$

де P_e – електронна потужність, котра з'являється у МЕП-приладах при переході електронів з нижчого мінімуму зони провідності до більш високих побічних мінімумів; $P_{\text{вх}}$ – потужність, що надходить на вхід МЕП-приладу типу ТБХ; P_3 – запасена у приладі потужність біжучої хвилі; $P_{\text{п}}$ – потужність активних втрат у напівпровіднику приладу.

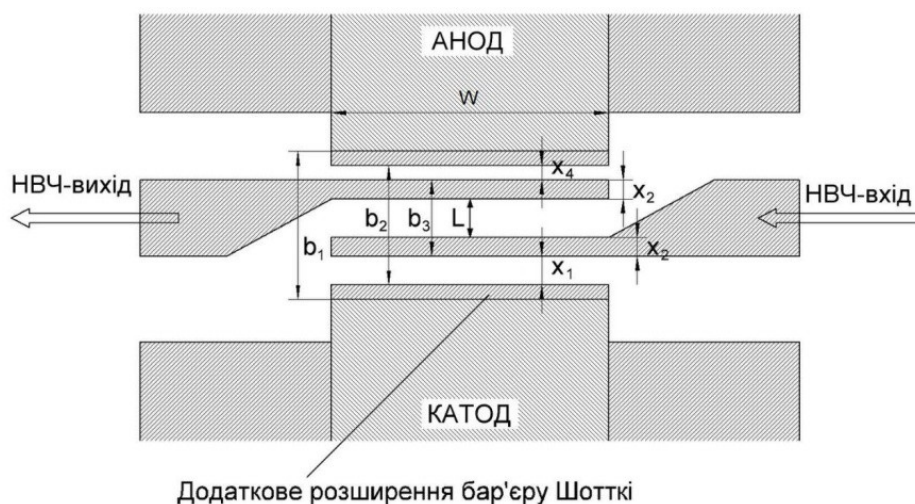


Рисунок 5.1 – Типова топологія МЕП-приладу з бар'єрами Шотткі типу ТБХ (розшифровку позначень до рисунку наведено у пункті 5.2)

При передачі енергії без зміни її значення співвідношення (5.1) для одиничної площі поперечного перерізу робочого об'єму може бути записано у вигляді [173]:

$$P_e = P_3 + P_{\pi}. \quad (5.2)$$

$$P_e = \frac{1}{(2t_e L)} (I_{en} U_n - I_{eB} U_{\min}) = \frac{en_0}{2t_e L} (\mu_n E_n U_n - \mu_B E_{\min} U_{\min}) S,$$

$$\text{звідки} \quad P_e \approx \frac{en_0 v S}{2t_e L} (U_n - U_{\min}), \quad (5.3)$$

I_{en} , I_{eB} – струм, що протікає крізь прилад при концентрації носіїв заряду n_0 відповідно у нижній і верхній долинах зони провідності; U_n , E_n – порогові значення напруги та напруженості, U_{\min} , E_{\min} – прискорюючі напруга й напруженість при мінімальному струмі, який протікає крізь прилад у режимі генерації; μ_n , μ_B – рухливість електронів у нижній і верхній долинах зони провідності; S – робоча площа приладу, крізь яку протікає струм щільністю $j = \frac{en_0 v}{S} = l t_e$, де l – ширина, t_e – товщина епітаксійного шару робочої площі; e – заряд електрону; n_0 – повна концентрація носіїв у долинах зони провідності; v – середня швидкість електронів.

Електронна потужність P_e відповідає співвідношенню (5.3), якщо $U \approx U_n$, концентрація носіїв у нижній n_n і верхній n_B долинах зони провідності буде

$$n_n \approx n_0, n_0 \approx 0, \text{ а при } U \approx U_{\min} - n_B \approx n_0, n_n = 0.$$

НВЧ потужність, запасена у приладі:

$$P_3 = \frac{d}{dt} (p T l) = \frac{d}{dt} (\epsilon_S v T l) = \frac{d}{dt} (\epsilon'_p \omega T l |U_1|^2), \quad (5.4)$$

при середній потужності $P_3 = P_3 / T$ за період T ,

$$p = \epsilon_S' m = \epsilon'_p \omega |U_1|^2, [170] \quad (5.5)$$

де p – потужність біжучої хвилі з періодом T на одиницю ширини l робочої площі приладу; ϵ_S' – середня енергія на одиницю площі S' . $S' = lL$, L –

довжина приладу від катоду до аноду; v – дрейфова швидкість електронів, яка встановилась; ϵ'_p – діелектрична проникність пасивного середовища з урахуванням заземлених поверхонь, ω – кутова частота; U_1 – НВЧ напруга (потенціал біжучої хвилі у пасивному середовищі, що знаходиться над та під електронним потоком).

Потужність насичення біжучої хвилі можна оцінити [170] підставивши

$$U_1 = \frac{v}{\omega} E_x \quad (5.6)$$

у (5.5), де E_x – НВЧ електричне поле (рисунок 5.1) і визначивши максимальне значення E_x .

При множенні (5.6) на $\frac{1}{y_0}$ та на $f^2 = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2$ отримаємо відносно простий вираз для добутку НВЧ потужності на імпеданс і на квадрат частоти [170]. Тут y_0 – характеристична повна провідність біжучих хвиль просторового заряду на одиницю ширини; f – частота.

$$pZf^2 \approx \frac{v^2}{8\pi^2} |E_x|^2. \quad (5.7)$$

Авторами [170,171,174] визначено, що при $E_x=6 \cdot 10^5$ В/м та $v=10^5$ м/с маємо $p \cdot Z \cdot f^2 \approx 0,5 \cdot (10^{10})^2$ В²/с² - вихідна потужність обмежена значенням напруги, котру можна створити на довжині, дорівнюючій приблизно 0,1 довжини хвилі. На частоті 10^{10} Гц ця напруга дорівнює 0,7 В.

Потужність активних втрат:

$$P_{\pi} = \frac{GU_1^2}{2} = \left(\frac{U_1^2 l t_e}{2\rho L} \right), \quad (5.8)$$

де G – провідність епітаксійного шару напівпровідника; ρ – питомий опір напівпровідника.

Підставивши у (5.2) співвідношення (5.3), (5.4) та (5.8) з урахуванням виразу, визначаючого U_1 для одномірних біжучих хвиль, отримуємо:

$$U_1 \approx \{1 - e^{2\beta(|y|-d)}\} e^{-\beta(ix+|y|)} e^{i\omega t} \quad (5.9)$$

де β – комплексний коефіцієнт розповсюдження; t – час.

Якщо ввести позначення:

$$P_e = \frac{P_e}{l}, g = \frac{t_e}{2\rho L}, B = \varepsilon'_p \omega, \Phi = \{1 - e^{2\beta(|y|-d)}\} e^{-\beta(ix+|y|)}$$

отримаємо рівняння для НВЧ напруги $U_1(t)$ на одиницю ширини робочої площі МЕР-приладу:

$$\frac{l}{U_1(t)} dU_1(t) = \frac{l}{2BT} \left(\frac{P_e}{\Phi^2 |e^{2i\omega t}|} - q \right) dt \quad (5.10)$$

Рішенням (5.10) є співвідношення

$$\frac{U_1(t)}{U_1(0)} = \exp \left\{ \frac{1}{2BT} \left[\frac{P_e (1 - |e^{2i\omega t}|)}{2i\omega \Phi^2} - qt \right] \right\} \quad (5.11)$$

Співвідношення (5.11) знайдене при початкових умовах $t=0$, $U_1(t)=U_1(0)$, при яких стала інтегрування:

$$C = \frac{1}{2BT} \left(-\frac{P_e}{2i\omega \Phi^2} \right) \ln U_1(0). \quad (5.12)$$

При малих значеннях t , коли $t/T \leq 0,1/T$, де T – тривалість періоду НВЧ коливань, а також при розкладанні показової функції у ступеневий ряд можна

обмежитися першими двома лінійними членами ряду з похибкою, що не перевищує при розрахунках 10%, значення $U_1(t)$ й визначається співвідношенням:

$$\frac{U_1(t)}{U_1(0)} = 1 + \frac{2\pi}{\omega BT^2} \left(\frac{P_e}{\Phi^2} - q \right) \frac{t}{T}. \quad (5.13)$$

З (5.13) видно, що при $t=0$, $U_1(t)=U_1(0)$. НВЧ напруга біжучої хвилі не зростає при збільшенні t/T , якщо вся електронна потужність витрачається на покриття активних втрат у напівпровіднику. У цьому випадку $P_e=q\Phi^2$ й при $t/T \neq 0$ НВЧ напруга $U_1(t)$ дорівнює її початковому значенню $U_1(0)$, що також витікає з (5.13).

Таким чином, при встановленні НВЧ коливань НВЧ напруга на початку процесу при дуже малих значеннях часу (коли $t/T \leq 0,1$) зростає за кривою, яку можна апроксимувати лінійною залежністю згідно (5.13), а далі експоненціально, відповідно до (5.11).

Для визначення закону зміни $U_1(t)$ у часі поблизу встановленого режиму вирішуємо (5.10) з урахуванням граничних умов $t=T_{\text{вст}}$, $U_1(t)=U_1(t_{\text{вст}})$, і знайшовши вираз, аналогічний (5.11), при $(t_{\text{вст}}-t)/T \leq 0,1$, коли можливо обмежитися першими двома членами розкладання показової функції у ступеневий ряд з похибкою, що не перевищує при розрахунках 10%, визначимо

$$\frac{U_1(t)}{U_1(t_{\text{вст}})} = 1 - \frac{2\pi}{\omega BT^2} \left(\frac{P_e}{\Phi^2} - q \right) \frac{t_{\text{вст}}-t}{T}. \quad (5.14)$$

З (5.14) видно, що при $t=t_{\text{вст}}$, $U_1(t)=U_1(t_{\text{вст}})$. При $t \neq t_{\text{вст}}$ $(t_{\text{вст}}-t)/T \leq 0,1$ до встановлення сталого рівня НВЧ коливань вони нарощуються за лінійним законом, який приходить на зміну експоненціальному закону (5.11).

В сталому режимі НВЧ коливань збільшення у часі НВЧ напруги біжучої хвилі припиняється. У цьому випадку для екстремальних значень біжучої хвилі справедливе рівняння:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{U_1(t)}{U_1(0)} \right), \quad (5.15)$$

при якому з (5.15) знаходимо умову сталого режиму

$$\frac{P_e}{\Phi^2 q} e^{-2i\omega t} = 1, \quad (5.16)$$

або з використанням формули Ейлера для показової функції $e^{-2i\omega t}$:

$$\frac{P_e}{\Phi^2 q} (\cos 2\omega t - i \sin 2\omega t) = 1, \quad (5.17)$$

Отже в сталому режимі між електронною потужністю та потужністю активних втрат настає рівновага (5.17), що відповідає фізичній картині процесу.

Підставивши у (5.11) вираз (5.16), знайдемо, що у момент виникнення сталого режиму справедливе співвідношення:

$$\frac{U_1(t)}{U_1(0)} = \exp \left(\frac{-qt_{\text{вст}}}{2BT} \right) = \exp \left(\frac{-qt_{\text{вст}}}{2\varepsilon_p \omega T} \right), \quad (5.18)$$

з якого:

$$\frac{t_{\text{вст}}}{T} = \frac{2B}{q \ln \frac{U_1(t)}{U_1(0)}} = \frac{2\varepsilon_p \omega}{q \ln \frac{U_1(t)}{U_1(0)}}, \quad (5.19)$$

або:

$$\frac{t_{\text{вст}}}{T} = \frac{4\omega \varepsilon_p \rho l}{t_e \ln \frac{U_1(t)}{U_1(0)}}.$$

Підставляючи у (5.11), (5.14) та (5.19) числові значення параметрів НВЧ приладів, знаходимо час встановлення у них НВЧ коливань.

При значно менших значеннях t ($t/T \leq 0,1$) процес встановлення НВЧ коливань у МЕР-приладах проходить за лінійним законом та знаходиться приблизно за (5.14), при збільшенні t ($t/T \geq 0,1$) – за експонентою. Відповідно до (5.11) експоненціальний закон при $(t_{\text{вст}} - t)/T \leq 0,1$ знову змінюється лінійною залежністю, якою можна приблизно апроксимувати криву $U_1(t)=f(t)$ аж до встановлення сталого рівня НВЧ коливань.

В сталому режимі між електронною потужністю та потужністю втрат виникає рівновага, яка призводить до встановлення НВЧ коливань сталої амплітуди. У цьому режимі коливальний процес відбувається згідно (5.17).

Для часу переходу в сталому режимі, коли стає справедливим (5.16) та діє закономірність, що виражається (5.11) та знаходиться вираз (5.19).

Проаналізувавши (5.19) можна розрахувати час встановлення НВЧ коливань у МЕР-приладах типу транзистору біжучої хвилі.

Для МЕР-приладу з визначеними параметрами початкового матеріалу й відомими розмірами робочої області вираз (5.19) може бути представлено у вигляді співвідношення:

$$\frac{t_{\text{вст}}}{T} \ln \frac{U_1(t)}{U_1(0)} = a, \quad (5.20)$$

де a – стала для даного МЕР-приладу величина ($a \neq 0$).

З (5.20) видно, що у випадках, коли $t_{\text{вст}} \approx 0$ і $t_{\text{вст}} \rightarrow \infty$, значення НВЧ коливань не змінюється у часі та $U_1(t)=U_1(0)$. Це добре узгоджується з фізикою протікаючих процесів: перший випадок $t_{\text{вст}}=0$, $U_1(t)=U_1(0)$ описаний раніше, другий - $t_{\text{вст}} \rightarrow \infty$, $U_1(t)=U_1(0)$ - вказує, що значення $U_1(0)$ у даному випадку таке, що при ньому вже існує рівновага між електронною потужністю й потужністю втрат.

Для знаходження $t_{\text{вст}}$ для конкретних приладів у якості прикладу розглянемо МЕР-прилади, описані у [170-172]. Для них $\epsilon'_p=0,6 \cdot 10^{-10}$ Ф м⁻¹,

$g=4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ при ширині $l=0,05\cdot 10^{-2} \text{ м}$, довжина катод-анод $L=30\cdot 10^{-6} \text{ м}$. Тоді для частоти НВЧ коливань $f=10^{10} \text{ Гц}$, $a\approx 2$, $t_{\text{вст}}/T\approx 2$ при $U_1(t)/U_1(0) \approx 2,7$.

Знайдене значення $t_{\text{вст}}\approx 2T\approx 2\cdot 10^{-10} \text{ с}$ повністю відповідає експериментально визначеному часу затримки. Так, при $L=30\cdot 10^{-6} \text{ м}$ та швидкості дрейфу електронів $v=1,2\cdot 10^5 \text{ м/с}$ у робочому просторі МЕР-приладів час затримки, обумовлений процесом встановлення коливань, складає $2\cdot 10^{-10} \text{ с}$.

З (5.19) виходить, що час встановлення коливань $t_{\text{вст}}$ тим менший, чим менший питомий опір початкового матеріалу ρ і діелектрична проникність ϵ'_p з урахуванням заземлених поверхонь. Значення $t_{\text{вст}}$ залежить також від геометричних розмірів робочого простору МЕР-приладів: $t_{\text{вст}}$ нижчий при меншій довжині катод-анод L та більшій товщині епітаксійного шару t_e .

Моделювання показало залежність часу встановлення коливань від параметрів початкового матеріалу та від геометричних розмірів робочого простору МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі. Одержані рівняння можуть бути використані для розрахунку параметрів складних багатофункціональних МЕР-приладів з кількома керуючими електродами.

5.2 Конструктивно-технологічні особливості виготовлення МЕР приладу з бар'єрами Шотткі

У трьохелектродних МЕР-приладах [4,33,166,170-175,178] достатньо добре вивчено процеси зародження, стабілізації та захоплення доменів, а також досліджено різні математичні моделі та запропоновано програми розрахунку деяких параметрів. Розрахунки та експериментальні вимірювання на планарних МЕР-приладах [166] дозволили встановити, що зазвичай при застосуванні епітаксійного $n\text{-GaAs}$ з концентрацією носіїв заряду у епітаксійному шарі $n_0=2\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ генерація доменів сильного поля виникає при $n_0L \geq 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (L - довжина області біжучої хвилі), $n_0d \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (d -

товщина епітаксійного шару), мінімально можливі значення L та d дорівнюють 10 та 1 мкм відповідно. Правильний вибір цих співвідношень необхідний для отримання значного перепаду струму при генерації домену $\alpha = \Delta I / I_1 \geq 0,4$ [167].

Однак одним з актуальних завдань при розробці багатоелектродних МЕР-приладів залишається відпрацювання найбільш ефективних технологічних режимів виготовлення та вивчення впливу вихідного матеріалу на їх параметри. Не менш суттєвими є також властивості та надійність омичних контактів і бар'єрів Шотткі, а також відтворюваність технології їх виготовлення. Для виготовлення приладів на ефекті міждолинного переходу електронів необхідні надзвичайно чисті й однорідні напівпровідникові матеріали з низькою концентрацією глибоких донорних рівнів. Наразі для цієї мети використовують епітаксійні шари, які наносять на n^+ -підкладку. Типовий діапазон донорних концентрацій складає $10^{14} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$, довжини приладу – від декількох мікрометрів до сотень мікрометрів [33]. Також у [33] наголошують, що для покращення характеристик приладу замість омичних n^+ -контактів можливо використовувати контакти з обмеженою інжекцією, до яких відносять контакт Шотткі з малою висотою бар'єру (0,15...0,3 eV) та двошарову катодну структуру. Однак отримати бар'єр Шотткі невеликої висоти у напівпровідникових сполуках A_3B_5 досить складно. До того ж через експоненціальну залежність струму від температури обмежена область робочих температур. Тому катодні контакти з обмеженою інжекцією досі не створені. Двошарові катодні контакти, які складаються з шару високої напруженості та n^+ -шару, використовують у широкому діапазоні температур.

При виготовленні НВЧ підсилювачів на МЕР-приладах типу транзистору біжучої хвилі, у яких використовуються структури з бар'єром Шотткі, необхідно враховувати чинники, що впливають на характеристики приладів, і вміти керувати ними для отримання заданих параметрів. При недостатньо відпрацьованій технології нанесення омичних та інжектуючих

контактів для МЕР-приладів з бар'єром Шотткі типу ТБХ у перехідній області поблизу контакту може виникнути шар підвищеного опору. Це може спричинити деградацію генеруючого приладу. Якщо цей контакт є катодним контактом, то поблизу нього виникає стаціонарний домен сильного поля. У цьому випадку генерація взагалі може не виникнути [178].

У дисертації на підставі теоретичних та експериментальних досліджень омічних та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію n-типу провідності встановлено чіткі залежності якісних показників контактів $\text{Ag-Ge-In/n-n}^+\text{GaAs}$ та $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ від умов нанесення на підкладку контактного матеріалу та режимів їх термообробки. Це дозволило обґрунтовано запропонувати підхід до побудови МЕР-приладів типу ТБХ на основі досліджених контактних пар.

Розрахунок топології приладу (рисунок 5.1) базувався на основі вибору оптимального коефіцієнту підсилення в залежності від конструктивних розмірів і параметрів напівпровідникового матеріалу [166, 170]: Розшифровка позначень до рисунку 5.1, де представлено типову топологію МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі типу ТБХ [166,170,171,178]: x_1 - відстань між вхідним електродом і катодом, x_2 - ширина електродів, x_4 - відстань між вихідним електродом і анодом, W - ширина великих сплавних контактів (або довжина довгої тонкої ділянки електродів з бар'єром Шотткі. Мінімальна ширина електроду x_2 (рисунок 5.1), мінімальні розміри між вхідним електродом і катодом x_1 , вхідним електродом і анодом x_4 , обмежені роздільною здатністю процесів фотолітографії й суміщення. Також важливою є умова дотримання паралельності вхідного електроду й катоду та вхідного електроду й аноду, оскільки від цього залежить розподіл електричного поля у приладі, яке має помітний вплив на його характеристики.

У якості початкового матеріалу було обрано монокристалічний $\text{n-n}^+\text{GaAs(111)B}$ з концентрацією донорів $(1...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, товщина епітаксійного шару 2 мкм, з однорідним рівнем легування і високою

рухливістю зарядів $\mu \geq 5000 \dots 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. Розміри МЕП приладу з бар'єрами Шотткі (рисунок 5.1): $L=50 \text{ мкм}$, $W=500 \text{ мкм}$, $x_1=10 \text{ мкм}$, $x_2=5 \text{ мкм}$, $x_4=7 \text{ мкм}$, $b_1=91 \text{ мкм}$, $b_2=77 \text{ мкм}$, $B_1=130 \text{ мкм}$, $B_2=130 \text{ мкм}$, $b_3=60 \text{ мкм}$. Ширина приладу приблизно у 5 разів більша довжини зазору анод-катод, тобто $\approx 5b_1$.

Поверхню зрощеного GaAs відразу ж покривали шаром SiO_2 товщиною $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (0,2 мкм). Потім у шарі SiO_2 з використанням спеціально виготовленої маски і процесів фотолітографії (нанесення фоторезисту, сушка пластин при температурі 288...293 К продовж 16 хвилин, експонування, прояв фоторезисту у 2% розчині Na_3PO_4 , задублення фоторезисту при 433 К протягом 40 хвилин) розкривалися відносно великі вікна (довжиною приблизно $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ (100 мкм)), крізь які на GaAs осаджували омічні сплавні контакти Ag-Ge-In. Після цього за допомогою процесу фотолітографії та іншої маски розкривалися отвори SiO_2 під контакти з бар'єром Шотткі. Ці два контакти повинні бути паралельними краям омічних контактів. Ширина великих сплавних контактів (або довжина довгої тонкої ділянки електродів з бар'єром Шотткі) складала 500 мкм.

GaAs-підкладку перед напиленням металевої плівки знежирювали у суміші метилового спирту і толуолу (1:2), промивали у гарячій і холодній дистильованій воді. Для травлення GaAs необхідний ефективний травник. Досвід роботи з різними травниками показав, що оптимальний результат [162,164] дає травлення відкритих ділянок пластин GaAs у розчині $3\text{H}_2\text{SO}_4$ - $1\text{H}_2\text{O}$ - $1\text{H}_2\text{O}_2$ з подальшою витримкою у діоксіянтарній кислоті протягом $1,2 \cdot 10^3$ секунд, ретельне промивання у гарячій, холодній дистильованій та деіонізованій воді та у метиловому спирті. На підкладки, попередньо відпалені при температурі 873 К впродовж 60 секунд [162,164] та охолоджені до 453 К, наноситься потрібний сплав.

Після нанесення омічних контактів термічним випаровуванням перед їх відпалом видаляється шар фоторезисту. При видаленні фоторезисту зазвичай застосовують гарячу сірчану кислоту, проте H_2SO_4 підтравлює GaAs та

частково знімає шар сплаву Ag-Ge-In, що призводить до розмиття кордонів контакту. Ці недоліки усуваються, якщо для видалення задубленого шару фоторезисту застосовувати розчин діоксану. Після витримки протягом $1,8 \cdot 10^3$ секунд у цьому розчині фоторезист легко видаляється, абсолютно не торкнувшись шару контакту. Відпал напиленої структури Ag-Ge-In/GaAs [162,165] проводився при температурі 893 К упродовж 60 секунд, швидкість підйому температури відпалу складала 7,2 К/с, швидкість охолодження контакту після відпалу - 4,75 К/с. Робочий вакуум - $2 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Нанесення плівки срібла для створення контактів з бар'єром Шотткі проводилось на підкладку при температурі 453 К у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ Торр. Для напиленої структури температура відпалу складає 803 К, час відпалу - $6 \cdot 10^2$ секунд, швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{\text{нагр}}=4,72$ К/с; $V_{\text{охол}}=4,72$ К/с.

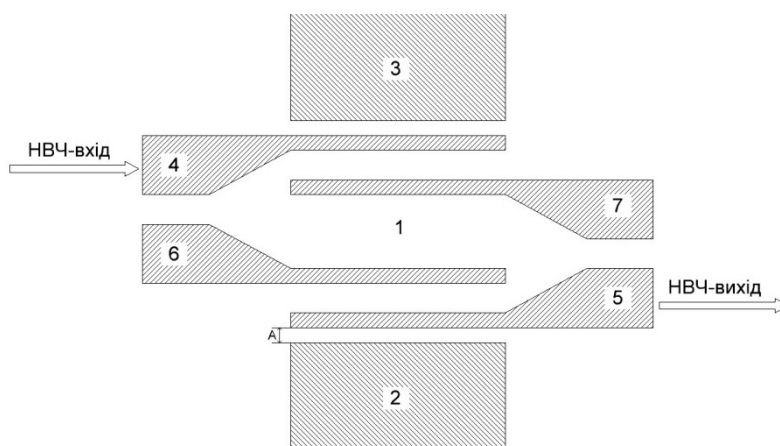
5.3 Моделювання тонкоплівкового багатофункціонального МЕР-приладу з кількома керуючими електродами

Відомі НВЧ прилади типу ТБХ [166, 170-178], які мають шар арсеніду галію n-типу на напівізолюванні підкладці, два омичних контакти до шару GaAs та два електроди з бар'єрами Шотткі, розташовані поблизу омичних контактів та паралельні їм.

У МЕР-приладах з бар'єрами Шотткі типу ТБХ (рисунок 5.1) при подачі на омичні контакти й електроди напруги постійного струму, а на вхідний електрод Шотткі НВЧ сигналу, у шарі арсеніду галію виникає біжуча хвиля, яка експоненціально зростає від входу до виходу приладу. Вимкнення приладу і усунення розкиду параметрів, виникаючих при виготовленні окремих приладів, здійснюється шляхом зміни напруги, прикладаєної до електродів з омичними контактами і з бар'єром Шотткі. Функціональні можливості приладу обмежуються відсутністю керуючих електродів, які

дозволили б керувати процесами утворення і поширення біжучої хвилі при незмінній напрузі на омичних контактах, а також вхідному та вихідному електродах з бар'єрами Шотткі.

Функціональні можливості МЕП-приладу можна розширити, завдяки створенню додаткових керуючих електродів, які будуть розміщені над областю розповсюдження біжучої хвилі симетрично відносно горизонтальної осі приладу (рисунок 5.2).



1 - епітаксінний шар арсеніду галію n-типу; 2, 3 - паралельні електроди з омичними контактами Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs; 4, 5 - електроди з бар'єрами Шотткі Ag/n-n⁺GaAs, розташовані на шарі арсеніду галію паралельно електродам з омичними контактами; 6, 7 - керуючі електроди, паралельні до електродів 4 і 5.

Рисунок 5.2 – Тонкоплівковий багатофункціональний МЕП-прилад з кількома керуючими електродами

На рисунку 5.2 схематично представлено змодельований [179] тонкоплівковий багатофункціональний МЕП-прилад з кількома керуючими електродами. Розміри керуючих електродів розраховуються з урахуванням допустимої розсіюваної потужності та мінімальної ширини плівки. З технологічних міркувань ширина керуючих електродів повинна дорівнювати ширині вихідному електроду з бар'єрами Шотткі 5. Істотне збільшення ширини керуючих електродів (в 2...5 разів) може привести до різкого збільшення шумів.

У порівнянні з процесом виготовлення МЕР-приладу типу ТБХ (рисунок 5.1) трудомісткість і матеріаломісткість в процесі виготовлення тонкоплівкового багатофункціонального МЕР-приладу з кількома керуючими електродами несуттєво збільшується, оскільки керуючі електроди можна виготовити одночасно з електродами з бар'єром Шотткі $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ та з того ж матеріалу (див. п. 5.2).

Відстань між електродами 4 і 7 і електродами 5 і 6 обрані $(1,5 \dots 2) \cdot A$ за величиною, де A - відстань між електродом 5 і омичним контактом 2. Це повинно забезпечити необхідну для роботи приладу напруженість електричного поля і виключити можливість електричного пробоя арсеніду галію. Ця відстань залежить від опору початкового арсеніду галію й від величини напруги зсуву, яка подається на електроди в процесі подальшої роботи приладу.

Усунення розкиду параметрів, які виникають при виготовленні окремих приладів, і встановлення оптимальних умов утворення та поширення НВЧ біжучої хвилі здійснюється шляхом зміни напруги, прикладеної до електродів 2, 3 та електродів 5, 4.

При подачі на вхідний електрод 4 НВЧ сигналу в діапазоні від 2 до 18 ГГц між електродами 2 та 3 прикладається постійна напруга - (-80 В) на електрод 3, найближчий до вхідного електроду 4. Напруга зсуву прикладається також до електродів 4 і 5, (-85 В) на вхідний електрод 4, і до керуючих електродів: (-90 В) на електрод 7 і (-10 В) на електрод 6. При подачі на електроди 6 і 7 імпульсів напруг, однакових за величиною та полярністю (+10 В), у шарі арсеніду галію виникає біжуча хвиля, котра експоненціально зростає від входу до виходу приладу, тобто прилад вмикається, а на його виході з'являється посилений НВЧ сигнал. Після закінчення імпульсів прилад вимикається.

МЕР-прилад може виконувати функцію діода Шотткі. Систему «керуючий електрод 6 або 7 - арсенід галію - омичний контакт 3» можна розглянути як діод Шотткі у випадку, коли напруженість поля між контактом

3 і електродами 6 і 7 більша, ніж між контактом 2 і електродами 6 і 7. У початковому стані (-90 В) на електрод 7 і (-10 В) на електрод 6 бар'єри Шотткі зміщені в прямому напрямку і відбувається інжекція основних носіїв заряду електронів в об'єм напівпровідника. Внаслідок цього в області утворення біжучої хвилі концентрація основних носіїв заряду збільшується, а напруженість поля падає нижче порогу міждолинного електронного переходу. Тому прилад знаходиться у вимкненому стані. При подачі на електроди імпульсів напруги ($+10$ В) бар'єри Шотткі цих електродів зміщуються в зворотному напрямку й інжекція основних носіїв заряду припиняється. Концентрація основних носіїв зменшується внаслідок їх рекомбінації на омичному контакті. В результаті цього напруга поля, виникаюча поблизу вхідного електрода, збільшується, досягаючи критичної величини, що викликає зародження домену, утворення і поширення біжучої хвилі НВЧ. Прилад вмикається. Якщо імпульс напруги ($+10$ В) подано тільки на один з керуючих електродів, наприклад 6, НВЧ прилад знаходиться у вимкненому стані, тому що основні носії заряду інжектуються в об'єм арсеніду галію і крізь прямозміщений бар'єр Шотткі іншого керуючого електрода відповідно. Тим самим порушуються оптимальні умови утворення і розподілу біжучої хвилі НВЧ.

МЕП-прилад може виконувати функцію транзистора біжучої хвилі при відключенні керуючих електродів від джерела живлення. Кращі зразки МЕП-приладів типу ТБХ [178] підсилювали сигнал на частотах від 2 до 15 ГГц. Середній коефіцієнт підсилення при стабільному сумарному підсиленні 18 дБ на 8,5 ГГц складав 4 дБ.

МЕП-прилад може виконувати функції НВЧ генератору при особливих режимах подачі напруги зміщення на контакти й електроди. В цьому випадку зміною напруги на керуючих електродах можна регулювати коефіцієнт зворотного зв'язку генератора.

МЕП-прилад може додатково виконувати функції швидкодіючого елемента, котрий реалізує логічну функцію «І». Час увімкнення та час

вимкнення такого елемента становить величину порядку 0,4...0,6 нс, що обумовлено сумою часу розсмоктування об'ємного заряду основних носіїв, інжекттованих з керуючих електродів та часу дрейфу хвилі просторового заряду у шарі арсеніду галію.

Висновки до розділу 5

1. Запропоновано спрощену математичну модель, завдяки якій показана залежність часу встановлення коливань від параметрів початкового матеріалу і від геометричних розмірів робочого простору МЕР-приладів з бар'єрами Шотткі. Одержані рівняння можуть бути використані для розрахунку параметрів складних багатофункціональних МЕР-приладів з кількома керуючими електродами.

2. Визначено конструктивно-технологічні особливості виготовлення тонкоплівкового багатофункціонального МЕР-приладу на основі контактних пар $\text{Ag-Ge-In/n-n}^+\text{GaAs}$ і $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$.

3. Змодельовано тонкоплівковий багатофункціональний МЕР-прилад з розширеними функціональними можливостями, у якого керуючі електроди дають можливість керувати процесами утворення та поширення біжучої хвилі при незмінній напрузі на омичних контактах, а також вхідному й вихідному електродах з бар'єрами Шотткі.

На розроблений багателектродний МЕР-прилад отримано Патент України на корисну модель № 132132 (2019 р.) [179].

Результати даного розділу опубліковано у роботах [162,178,179].

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки та оптимізації технологічних режимів відтворюваного отримання низькоомних омічних контактів та інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs n-типу, що дозволило розробити новий підхід до побудови МЕР-приладу на їх основі.

На основі аналізу проведених досліджень одержано наступні теоретичні та науково-практичні результати, які дозволяють стверджувати, що поставлені задачі вирішено, а мета роботи досягнута:

1. Запропоновано модель контакту метал-напівпровідник, яка базується на процесах перенесення між електронами металу, граничними станами і вільними носіями, враховує фізичний механізм переміщення заряду у структурі метал-напівпровідник відповідним підбором кінетичних коефіцієнтів у процесах перенесення.

2. Досліджено та запропоновано спосіб хімічної обробки, який призводить до пасивації поверхні арсеніду галію та дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів відповідно запропонованої моделі. Встановлено, що якість омічних та інжектуючих бар'єрних переходів покращується, якщо GaAs-підкладку після хімічної обробки у сірчанокиислому травнику додатково витримати у діоксіянтарній кислоті впродовж $1,2 \cdot 10^3$ секунд.

3. На основі експериментальних досліджень розроблені оптимальні температурні режими відтворюваного отримання у вакуумі омічного контакту Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs, при яких значення питомого перехідного опору омічного контакту знижується до $\rho_k = (5...7) \cdot 10^{-5}$ Ом·см², а саме попередній температурний відпал GaAs-підкладки при 873 К, температура підкладки при нанесення матеріалу контакту - 453 К, відпал отриманої структури при 893 К упродовж 60 с, швидкість підйому температури відпалу 7,2 К/с, швидкість

охолодження контакту після відпалу $4,75 \text{ K/s}$. При цьому попередня термообробка, підвищення температури підкладки до заданої, осадження плівки потрібного сплаву, подальший відпал напиленої плівки проводяться у єдиному вакуумному циклі за вищезазначених умов, що дозволяє отримувати металеві плівки без забруднень. На відміну від аналогів питомий перехідний опір контакту на основі срібла зменшується на порядок та є близьким до відповідних параметрів контактів на основі золота. Отримані контакти не змінюють свої властивості в інтервалі температур від 273 K до 453 K і мають лінійну вольт-амперну характеристику. Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

4. На основі експериментальних досліджень встановлено та рекомендовано оптимальні температурні режими формування у єдиному вакуумному циклі інжектуючих бар'єрних переходів $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ з висотою потенційного бар'єру $0,98 \text{ В}$, коефіцієнтом інжекції $\gamma = 10^{-8}$, фактором неідеальності $\eta = 1,087$: температура підкладки під час напилення 393 K , температура відпалу 803 K , час відпалу $6 \cdot 10^2$ секунд, швидкість підйому температури відпалу та охолодження відповідно $V_{\text{нагр}} = 4,72 \text{ K/s}$; $V_{\text{охол}} = 4,72 \text{ K/s}$. Запропонований спосіб захищено патентом України на корисну модель.

5. Встановлено, що точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висоти потенційного бар'єру ϕ_B і фактору неідеальності η) залежить не тільки від точності вимірювання струму і напруги, але й від методу їх визначення. Показано, що для бар'єру Шотткі $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$ з $\phi_{Bn} = 0,98 \text{ В}$ при температурі 300 K фактор неідеальності змінюється від $\eta = 1,087$ до $\eta = 1,376$ за результатами розрахунків за вольт-амперними характеристиками чотирма різними методами. При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру рекомендується метод *direct approximation*, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

6. Результати експериментальних досліджень дозволили доповнити уявлення про закономірності формування контактів на основі срібла до

арсеніду галію при різних температурних режимах, визначити умови стабілізації електрофізичних параметрів та рекомендувати розроблені режими термообробки контактних структур при виготовленні МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі.

7. На основі запропонованої спрощеної математичної моделі МЕР-приладу з бар'єрами Шотткі розроблено багатоелектродний МЕР-прилад з розширеними функціональними можливостями, до складу якого входять керуючі електроди, розташовані над областю розповсюдження біжучої хвилі. Вказаний прилад при визначених режимах здатен виконувати функції діоду Шотткі, транзистору біжучої хвилі або НВЧ генератору, що дозволить отримати техніко-економічний ефект за рахунок зменшення витрат на розробку ряду приладів НВЧ діапазону. Запропонований прилад захищено патентом України на корисну модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chan Hyeong Parka, Jong-Ho Lee. Formulas of 1/f noise in Schottky barrier diodes under reverse bias. *Solid-State Electronics*. 2012. Vol. 69. P. 85–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2011.11.030>.
2. Кольцов Г. И., Диденко С. И., Черных А. В., Черных С. В., Чубенко А. П., Свешников Ю. Н.. Контакты Шоттки к высокоомным эпитаксиальным слоям GaAs для детекторов частиц и квантов. *Физика и техника полупроводников*. 2012. №8. С. 1088–1093. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7776>.
3. Korucua D., Turutb A., Altındalc Ş. The origin of negative capacitance in Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs) prepared by photolithography technique in the wide frequency range. *Current Applied Physics*. 2013. Vol.13, №6. P. 1101–1108. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2013.03.001>.
4. Малошумящие арсенид-галлиевые усилители при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей / С. В. Платонов и др.; *Вестник Новгородского государственного университета*. 2012. №67. С. 29–32. URL: <http://www.novsu.ru/file/1010219>.
5. Мокеров В. Г. Гетероструктурная СВЧ электроника - новые перспективы нанoeлектроники. *Микросистемная техника*. 2004. №10. С. 13–15.
6. Schottky structure in GaAs semiconductor device: pat. 6,787,910 United States: H01L 21/31. № 10/200,118; filed. 23.07.2002; publ. 29.01.04, US 2004/0016984.
7. Lin Hung-Cheng, Senanayake Sidat, Cheng Keh-Yung. Optimization of AuGe–Ni–Au Ohmic Contacts for GaAs MOSFETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2003. Vol. 50, № 4. P. 880–885.
8. Huo P., Rey-Stolle I. Ti/Pd/Ag Contacts to n-Type GaAs for High Current Density Devices. *Journal of Electronic Materials*. 2016. Vol. 45, №6. P. 2769–2775. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-4432-6>.

9. Kim D. M., Kim D. H., Lee S.Y. Characterization and modelling of temperature-dependent barrier heights and ideality factors in GaAs Schottky diodes. *Solid State Electronics*. 2007. V.51. P.865-869.

10. Sachenko A. V., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Vitusevich S. A., Novitskii S. V., Sheremet V. N., Pilipchuk A. S. The temperature dependence of the resistivity of ohmic contacts based on gallium arsenide and indium phosphide in the 4.2–300 K range. *Technical Physics Letters*. 2016. Vol. 42, № 6. P. 649–651. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1063785016060286>.

11. Jayavel P., Kumar J., Ramasam P., Premanand R.. On the evaluation of Schottky barrier diode parameters of Pd, Au and Ag/n-GaAs. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2001. Vol. 7. №5-6. P. 340–343. URL: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24425/1/IJEMS%207%285-6%29%20340-343.pdf>

12. Ерофеев Е. В. Формирование контактов металл-полупроводник с металлизацией на основе Al и Cu для GaAs СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 01.04.04 / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2012. 24 с. URL: <http://old.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/education/diss/2012/03/01.pdf>

13. Sachenko A. V., Belyaev A. E., Konakova R. V. On the ohmicity of Schottky contacts. *Semiconductors*. 2016. Vol. 50, №. 6. P. 761–768. DOI: <http://doi.org/10.1134/S106378261606021X>.

14. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника : в 2 кн. Кн. 2. М.: Техносфера, 2015. 489 с.

15. Швец Е. Я., Коломоец А. Г. Оценка перспектив применения арсенида галлия и сплавов на его основе в качестве материалов для солнечных элементов. *Металлургия*. 2013. №2 (30). С. 132–136.

16. Tecimer H., Türüt A., Uslu H., Altındal Ş., Uslu İ. Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped)PVA/n-GaAs Schottky barrier

diodes (SBDs). *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. Vol. 199. P. 194–201. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.05.027>.

17. Безрядин Н. Н., Котов Г. И., Арсентьев И. Н., Власов Ю. Н., Стародубцев А. А. Влияние финишной подготовки поверхности арсенида галлия на спектр электронных состояний n-GaAs(100). *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46, № 6. С. 756–760. – URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7720>

18. Мурель А. В., Данильцев В. М., Демидов Е. В., Дроздов М. Н., Шашкин В.И. Влияние быстрого термического отжига на параметры арсенидгаллиевого низкобарьерного диода с приповерхностным δ -легированием. *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47, №11. С. 1481–1485. – URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5121>.

19. Mechanistic Characteristics of Metal-Assisted Chemical Etching in GaAs / H. Cheung et. al. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2014. №118. С. 6903–6908. DOI:10.1021/jp500968p

20. Surface Charge Transfer Doping of III–V Nanostructures / K. Takei et. al. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013. №117. P. 17845–17849. DOI: 10.1021/jp406174r

21. Нанoeлектронные эффекты в удельном контактном сопротивлении полупроводниковых структур с высокой плотностью дислокаций / А. В. Саченко и др. *Наноструктурные материалы - 2012: Россия – Украина – Беларусь: тезисы докладов III Международной научной конференции* (Санкт-Петербург, Россия, 19—22 ноября, 2012 г.). Санкт-Петербург: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2012. С. 37.

22. Дмитрієв В. С., Швець Є. Я. Дослідження впливу рівня інжекції неосновних носіїв заряду у контактах метал-напівпровідник на параметри напівпровідникових приладів НВЧ діапазону. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА* (Запоріжжя, 20-24 квіт. 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.3.

23. Sachenko A. V., Belyaev A. E., Konakova R. V. On a new mechanism for the realization of ohmic contacts. *Semiconductors*. 2018. Vol. 52, № 1. P. 131–135. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1063782618010190>.

24. Способ изготовления многослойного омического контакта к n-GaAs: пат. 2407104 Российская Федерация, МПК H01L 21/28, B82B 3/00. № 2009129813/28; заявл. 03.08.09; опубл. 20.12.10, Бюл. № 35. 11 с. URL: <http://www.fips.ru/Archive/PAT/2010FULL/2010.12.20/DOC/RUNWC1/000/000/002/407/104/DOCUMENT.PDF>

25. Спосіб створення омичного контакту до InP та GaAs: пат. 83664 Україна, МПК H01L 21/268 (2006.01). № u201303026; заявл. 11.03.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18. 5 с.

26. Zhao W., Kim S., Zhang J., Adesida I. Thermally stable Ge/Ag/Ni Ohmic contact for InAlAs/InGaAs/InP HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*. 2006. Vol. 27, №1. P. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2005.860381>

27. Иващук А. В. Тепловые режимы формирования омических контактов к арсениду галлия. *Технология и конструирование электронной аппаратуры*. 2000. 5-6. С. 43–45.

28. Стриха В. И., Бузанева Е. В., Радзиевский И. А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М.: Сов.радио, 1974. 248 с.

29. Стриха В. И. Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник. / Акад. наук Укр. ССР, Ин-т полупроводников. Киев: Наукова думка, 1974. 264 с.

30. Саченко А. В., Беляев А. Е., Конакова Р. В. Новый механизм реализации омических контактов. *Физика и техника полупроводников*. 2018, Т. 52, № 1. С. 138–142. DOI: 10.21883/FTP.2018.01.45333.8618

31. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.

32. Вяткин А. П., Максимова Н. К. Влияние межфазных взаимодействий на структуру и свойства контактов металл-арсенид галлия. *Новые материалы*

электронной техники / ред. Ф. А. Кузнецов. Новосибирск: Наука СО, 1990. С. 32–48.

33. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc., 2007. 815 p.

34. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.

35. Blank T. V., Goldberg Y. A. The current flow mechanism in metal-semiconductor ohmic contacts. *Semiconductors physics and technique*. 2007. Vol. 41, № 11. P. 1281–1308.

36. Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике / А. В. Беляев и др. / ред. Беляев А. Е., Конакова Р. В. Харьков: ИСМА, 2011. 284 с.

37. Sze S. M., Kwok K. N. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc., 2006. 832 p.

38. Баранский П. И., Ключков В.П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника: справочник. К.: Наукова думка, 1975. 706 с.

39. Rhoderick E. H. The physics of Schottky barriers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1970. Vol. 3, №8. P. 1153–1167.

40. Maeda Keiji. Mechanism of nonideality in nearly ideal Si Schottky barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2001. Vol. 19, №1. P. 268–274.

41. Мамедов Р. К. Выпрямляющие свойства узких контактов металл-полупроводник. *Известия НАНА, серия физ. мат. тех. наук*. 2001. №2-5. С. 13–17.

42. Sachenko A. V., Konakova R. V., Belyaev A. E. Physical mechanisms providing formation of ohmic contacts metal–semiconductor (Review). *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2018. Vol. 21, № 1. P. 5-40. DOI: <http://doi.org/10.15407/spqeo21.01.005>.

43. Божков В. Г., Зайцев С. Е. Модель тесного контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки. *Известия вузов. Физика*. 2005. №10. С. 77–85.

44. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Физика полупроводников (явления переноса в структурах с туннельно-тонкими полупроводниковыми слоями). Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1996. 236 с.
45. Гавриловец В. В., Бондаренко В. Б., Кудинов Ю. А., Кораблев В. В. Равновесное распределение мелкой примеси и потенциала в приповерхностной области полупроводника в модели полностью обедненного слоя. *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34, №4. С. 455–458.
46. Rhoderick E. H., Transport processes in Schottky diodes, in K. M. Pepper, ed., *Institute of Physics Conference Series.*, Vol. 22. Institute of Physics, Manchester, UK, 1974. P. 3-19.
47. Rhoderick E. H. Comments on the conduction mechanism in Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1972. Vol. 5, №10. P. 1920–1925.
48. Торхов Н. А., Еремеев С. В. Токоперенос в структурах $\text{Me}^- \text{-n-n}^+$ с барьером Шоттки. *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34, №1. С. 106–112. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/3705>
49. Торхов Н. А. Природа электрического взаимодействия контактов Шоттки. *Физика и техника полупроводников*. 2011. №8. С. 1041–1055. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7483>
50. Божков В. Г., Шмаргунов А. В. Влияние нелинейной зависимости высоты барьера от смещения на измеряемые параметры контактов с барьером Шоттки. *СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо – 2011)*: материалы 21-й Межд. Крымской конф. (г. Севастополь, 10 – 14 сентября 2011 г.). Севастополь: СевНТУ. 2011. С. 246-247. URL: http://naukainform.kpi.ua/CriMiCo/Crimico/2011/246_247.pdf
51. Rhoderick E. H., Williams R. H. Metal-Semiconductor Contacts. Oxford: Clarendon Press, 1988. 252 p.
52. Кудрик Я. Я., Шинкаренко В. В., Слепокуров В. С., Бигун Р. И., Кудрик Р.Я. Методы определения высоты барьера Шоттки из вольт-амперных характеристик. *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2014. Т. 49. С. 11-15.
53. Дмитриев В. С., Швец Е. Я. Экспериментальные исследования влияния уровня инжекции неосновных носителей заряда в контактах металл-

арсенид галлія на параметри приборів мікроволнового діапазона с бар'єрами Шоттки. *Радиоелектроніка і молодь в ХХІ веці*: матеріали 19-го міжнарод. молодіжного форуму (г. Харків, 20-22 апр. 2015 г.). Харків: ХНУРЕ, 2015. Т. 1. С. 17–18.

54. Дмитрієв В., Швець Є. Вплив інжектованих неосновних носіїв заряду на параметри діоду з бар'єром Шоттки. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвяч. 55-річчю заснув. ТНТУ та 170-річчю з дня народж. І. Пулюя (Тернопіль, 19–21 травня 2015 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 10–11.

55. Schäffler F., Abstreiter G. Formation of metal–semiconductor interfaces: From the submonolayer regime to the real Schottky barrier. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1985. Vol. 3, №4. P. 1184–1189.

56. Viturro R. E., Mailhiet C., Shaw J. L., Brillson L. J. Interface states and Schottky barrier formation at metal/GaAs junctions. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1989. Vol. 7, №3. P. 855–860. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.575810>

57. Viktorovitch P., Kamarinos G. General treatment of junction potentials in solids using irreversible thermodynamics. *The Journal of Chemical Physics*. 1975. Vol. 62, Is. 4. P. 1532–1549.

58. Dmitriev V. S. The modeling of the metal-semiconductor barrier transitions, which based on the chemical interaction. *SworldJournal*. 2016. Iss. j116 (10), Vol. 10. P. 55–58. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11610.pdf>.

59. Brillson L. J. Chemical mechanisms of Schottky barrier formation. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 1979. Vol. 16, №5. P. 1137–1141.

60. Harrick N. J. Metal to Semiconductor Contacts: Injection or Extraction for Either Direction of Current Flow. *Physical Review*. 1959. Vol. 115, Is. 4. P. 876–882.

61. Дмитриев В. С. Моделирование барьерных переходов металл-полупроводник на основе химического взаимодействия. *Научные труды Sword*. Иваново: Научный мир, 2016. Вып. 1(42), Т.4. С. 38–42.

62. Швець Є. Я., Дмитрієв В. С. Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції. *ХХ НТК студентів*,

магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квіт. 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.4.

63. Мирсагатов Ш. А., Утениязов А. К., Ачилов А. С. Механизм переноса тока в диодах с барьером Шоттки на основе крупноблочных пленок CdTe. *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54, вып. 9. С. 1643-1654

64. Шашкин В. И., Мурель А. В., Данильцев В. М., Хрыкин О. И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью δ -легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2002. Т. 36, № 5. С. 537-542.

65. Асанов Э. Э., Зуев С. А., Килесса Г. В., Слипченко Н. И., Старостенко В. В. Численная модель барьера Шоттки. *Прикладная радиоэлектроника*. 2012. №3. С. 378–383. URL: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/1006/1/13.pdf>

66. Chand S., Kamar L. Origin of non-ideal current-voltage characteristics of metal-semiconductor contact: A numerical study. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2000. Vol. 7, №5-6. P. 268–273. URL: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24409/1/IJEMS%207%285-6%29%20268-273.pdf>.

67. Özavcı E., Demirezen S., Aydemir U., Altındal Ş. A detailed study on current–voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. Vol. 194. P. 259–268. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.02.018>

68. Hernández M. P., Alonso C. F., Peña J. L. Extraction of Parameters of Homogeneous Nonideal Schottky Contacts Using I–V Measurements. *Physica Status Solidi (b)*. 2000. Vol. 220, №1. P. 789–792.

69. Торхов Н. А. Природа прямых и обратных токов насыщения в контактах металл–полупроводник с барьером Шоттки. *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44, №6. С. 767-774.

70. Leroy W. P., Opsomer K., Forment S., Van Meirhaeghe S. The barrier height inhomogeneity in identically prepared Au/n-GaAs Schottky barrier diodes.

Solid-State Electronics. 2005. Vol.49, №6. P. 878–883. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2005.03.005>

71. Sullivan J. P., Tung R. T., Pinto M. R., Graham M. R. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal of Applied Physics*. 1991. Vol.70, №12. P. 7403–7424.

72. Nonalloyed ohmic contacts to *n*-GaAs by solid-phase epitaxy of Ge. / E. D. Marshall et al. *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 62. №3. P. 942–947. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.339705>.

73. Mechanism of contact resistance formation in ohmic contacts with high dislocation density / A. V. Sachenko et al. *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 111, №8. P. 083701–083701–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3702850>

74. Ткаченко А. К., Новицкий С. В., Шеремет В. Н. Влияние быстрого термического отжига и СВЧ на удельное контактное сопротивление омических контактов к InP и GaAs. *Фундаментальные и прикладные проблемы физики. Материалы международной НТК: Ч.1. (г. Саранск, 28-30 мая 2012 г.)* Саранск: МордГПИ, 2012. С. 68–72. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/10534/1/Новицкий.pdf>.

75. Изготовление омических контактов к GaAs *n*-типа проводимости из сплавов Ag-Sn и Ag-Ge-In. / О. Д. Баранцева и др. *Электронная техника. Серия 1: Электроника СВЧ*. 1975. №12. С. 98–104.

76. Kawamura M., Yamaguchi M., Abe Y., Sasaki K. Electrical and morphological change of Ag–Ni films by annealing in vacuum. *Microelectronic Engineering*. 2005. Vol. 82, №3-4. P. 277–282.

77. Christou A. Solid phase formation in Au: Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au: Ge GaAs ohmic contact systems. *Solid-State Electronics*. 1979. Vol. 22, №2. P. 141–149.

78. Zhang D. H. Metal contacts to *n*-type AlGaAs grown by molecular beam epitaxy. *Materials Science and Engineering: B*. 1999. Vol. 60, №3. P. 189–193.

79. Very low resistance Au/Ge/Ni/Ag based Ohmic contact formation to Al_{0.25}/Ga_{0.75}As/GaAs and Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As heterostructures: A behavioral comparison / P. Zwicknagl et al. *Journal of Vacuum Science &*

Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1986. Vol. 4, №2. P. 476–484. DOI: <http://doi.org/10.1116/1.583406>.

80. Zhao W., Wang L., Adesida I. Electrical and structural investigations of Ag-based Ohmic contacts for InAlAs/InGaAs/InP high electron mobility transistor. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89, №7. P. 072105–1–072105–3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2337102>

81. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок / ред. В. В. Белошицкий; пер. с англ. В. А. Аркадьев, Л. И. Огнев. М.: Мир, 1989. 344 с.

82. Бондаренко В. Б., Кузьмин М. В., Кораблев В. В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника. *Физика и техника полупроводников*. 2001. Т. 35, №8. С. 964–968.

83. Петров П. Н., Калашникова Н. А., Жукова О. Д., Ермилов О. Д. Электрически активные дефекты монокристаллического арсенида галлия, вызванные обработкой. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1989. №6 (240). С. 54–57. Библиогр.: С. 57

84. Dmitriev V. S., Shvets E. Y. The influence of the semiconductor's surface states on straightening properties of devices. *XVIII НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА: матеріали XVIII наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 15-19 квіт. 2013 р.)*. Запоріжжя: ЗДІА, 2013. Т. 3. – С. 6.

85. Маркин Б. В., Чикун В. В. Влияние химической обработки на состав поверхности GaAs. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1990. №4. С. 19-22.

86. You J. H., Johnson H. T. Effect of Dislocations on Electrical and Optical Properties in GaAs and GaN. *Solid State Physics*. London: Academic Press, Elsevier Inc., 2009. Vol. 61. P. 143–261.

87. Способ пассивации поверхности GaAs: пат. 2402103 Российская Федерация: МПК H01L21/316. №2009133993/28; заявл. 10.09.09; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29. 8 с.

88. Способ получения атомно-гладкой поверхности подложки арсенида галлия: пат. 2319798 Российская Федерация: МПК Н 01 L 21/302. №2006116830/15; заявл. 16.05.06; опубл. 20.03.08, Бюл. №8. 7 с.
89. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Б. Д. Луфт и др.; М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
90. Майссела Л., Гленга Р. Технология тонких пленок. Москва: Сов. радио, 1977. Т. 1. 662 с.
91. Майссела Л., Гленга Р. Технология тонких пленок. Москва: Сов. радио, 1977. Т. 2. 766 с.
92. Новиков В. А. Исследование морфологии и электронных свойств поверхности пленок A_3B_5 и контактов металл/ A_3B_5 методом атомно-силовой микроскопии: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Томский гос. ун-т. Томск, 2010. 18 с.
93. Іващук А. В. Вплив технології металізації на параметри омічних контактів до GaAs. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2004. Т. 5, № 2. С. 382–386.
94. Спосіб виготовлення омічного контакту до GaAs: пат. 84122 Україна: МПК Н 01L 21/28. № u201304691; заявл. 15.04.13; опубл. 10.10.13, Бюл. № 19. 5 с.
95. Wang Y. G., Ashok S.. A study of Au/GaAs Schottky barriers with a cesiated interface. *Thin Solid Films*. 1989. Vol. 173, №2. P. L149–L152.
96. Thermal stability of Ag films in air prepared by thermal evaporation / L. Jing et.al. *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, №17. P. 7036–7040
97. Pressure dependence of Cu, Ag, and Fe/n–GaAs Schottky barrier heights / C. S. Gworek et al. *Physical Review B*. 2001. Vol. 64, №4. P. 3221–3226.
98. Sugawara K., Kawamura M., Abe Y., Sasaki K.. Comparison of the agglomeration behavior of Ag(Al) films and Ag(Au) films. *Microelectronic Engineering*. 2007. Vol. 84, №11. P. 2476–2480.
99. Kampen T. U., Park S., Zahn D. R. T. .Barrier height engineering of Ag/GaAs(100) Schottky contacts by a thin organic interlayer. *Applied Surface Science*. 2002. №190. P. 461–466. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00919-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00919-9).

100. Ludeke R., Chiang T. C., Miller T. Schottky barrier formation of Ag on GaAs(110). *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1983. Vol. 1, №3 P. 581–587. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.582602>.
101. Schottky barrier degradation of the W/GaAs system after high-temperature annealing / Kin Man Yu et al. *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 60, №9. P. 3235–3242.
102. Kim J. S., Choi H. H., Son S. H., Choi S. Y. Schottky barrier rectifier with high current density using vanadium as barrier metal. *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 79, №6. P. 860–862.
103. Каргин Н. И., Кузнецов А. Л., Сейдман Л. А., Чашкин Н. А., Шостаченко С.А. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2014. Выпуск 1 (232). С.75-84.
104. Ohmic electrode, method and multi-layered structure for making same: pat. US6313534B1 United States: H01L23/48, H01L23/52, H01L29/40. № US09/273,272; filed 22.03.1999; publ. 06.11.2001. 17 p.
105. Jayavel P., Asokan K., Kanjilal D., Kumar J. Investigations on the annealing behavior of high-energy carbon irradiated Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2001. Vol. 3, №3. С. 195–199.
106. Hudait M. K., Venkateswarlu P., Krupanidhi S. B. Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics*. 2001. Vol. 45, №1. P. 133–141.
107. Kuoppa V. Electrical characterization of nitrogen containing III-V semiconductors: Doctoral Dissertation / Helsinki University of Technology. Helsinki, 2007. 120 p. URL: <http://lib.tkk.fi/Diss/2007/isbn9789512286386/isbn9789512286386.pdf>
108. Дмитриев В. С. Развитие физической модели неоднородных контактов металл-полупроводник. Moderní vymoženosti vědy – 2014: materialy X mezinárodní vědecko-praktická konference (Praha, 27.01-05.02.2014) Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. Díl 39 «Technické vědy». С. 3–5. (ISBN 978-966-8736-05-6).

109. Sarpatwari K. Toward understanding the electrical properties of metal/semiconductor Schottky contacts: the effects of barrier inhomogeneities and geometry in bulk and nanoscale structures : Doctor of Philosophy Dissertation / The Pennsylvania State University. Old Main, State College, PA, 2009. 163 p.

110. Способ изготовления полупроводниковых приборов с барьером Шоттки на фосфиде индия: пат. 1335056 Российская Федерация, МПК H01L21/28. №3999786/25; заявл. 26.12.1985; опубл. 27.12.1995.

111. Weber E. R., Washburn J. Structure and reliability of Metal contacts to GaAs / E. R. Weber. Berkeley, CA: Office of naval research AD-A259 184, Department of Materials Science and Mineral Engineering University of California, 1991. 41 p.

112. Test Methods for Resistivity of Silicon Wafers with In-Line Four-Point Probe. *Annual book of ASTM standards 2005*. Baltimore: ASTM International, 2005. Vol. 10.

113. Нисков В. Я. Измерение переходного сопротивления омических контактов к тонким слоям полупроводников. *Приборы и техника эксперимента*. 1971. №1. С. 235–237.

114. Нисков, В. Я.; Заддэ, В. В.; Зайцева, А. К.; Стрельцова, В. И. Измерение переходного сопротивления контактов на тонких слоях полупроводника. *Приборы и техника эксперимента*. 1971. №2. С. 240–242.

115. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с

116. Кудрик Я. Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл-полупроводник. *Петербургский журнал электроники*. 2010. №1. С. 25–40.

117. Floating contact transmission line modelling: an improved method for ohmic contact resistance measurement / M. Lijadi et al.; *Solid-State Electronics*. 2005. Vol. 49, No. 10. P. 1655–1661.

118. Шеремет В. Н. Метрологические аспекты измерения сопротивления омических контактов. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2010. Т. 53, №3. С. 3–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/>

S0021347010030015.

119. Каганович Э. Б., Свечников С. В. Методы измерения контактного сопротивления полупроводниковых планарных структур (обзор). *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 1991. Вып. 21. С. 1–11.

120. Mak L. K., Rogers C. M., Northrop D. C. Specific contact resistance measurements on semiconductors. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1989. Vol. 22. №5. P. 317–320.

121. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов / А. Н. Андреев и др.; *Физика и техника полупроводников*. 1998. Т. 32, № 7. С. 832–838.

122. Sawdai D. Enhanced transmission line model structures for accurate resistance evaluation of small-size contacts and for more reliable fabrication. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1999. Vol. 46, №. 7. P. 1302–1311.

123. Чистяков Ю. Д., Баранов В. В., Достанко А. П. Анализ методов определения величины переходного сопротивления невыпрямляющих контактов. М.: ЦНИИ «Электроника», 1973. 64 с. (Обзоры по электронной технике. Полупроводниковые приборы ; вып. 7(143)).

124. Чистяков Ю. Д., Достанко А. П., Баранов В. В. Методы исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов.— М.: ЦНИИ Электроника, 1974. Вып. 7 (217) 32 с. (Обзоры по электронной технике). (Серия 2. Полупроводниковые приборы).

125. А.с. 239425 СССР, G01R 27/02. Способ определения переходного сопротивления между полупроводником и нанесенными на его поверхность контактами известной площади / В. В. Заддэ, А. К. Зайцева (СССР). № 1184639/18-10; заявл. 20.09.67 ; опубл. 18.03.69, Бюл. № 11.

126. Дмитриев В. С., Швец Е. Я. Анализ экспресс-методов исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов. *Сборник научных трудов Sword*. Иваново, 2013. Вып. 4, Т. 8. С. 59–63.

127. Мильвидский М. Г., Пелевин О. В., Сахаров Б. А. Физико-химические основы получения разлагающихся полупроводниковых соединений. М.: Металлургия, 1974. 392 с.
128. Драгметаллы в разрывных контактах. *Detaltorg-Блог: Радиодетали и все о них*. URL: http://detaltorg.ru/blog/radiodetali/dragmetally_v_razryvnyh_kontaktah.html
129. Panish M. B. Ternary Condensed Phase Systems of Gallium and Arsenic with Group IB Elements. *Journal of The Electrochemical Society*. 1967. Vol. 114, № 5. P. 516–521. URL: <http://jes.ecsdl.org/content/114/5/516.full.pdf>.
130. Іващук А. В. Формування омичних контактів з одночасним очищенням поверхні арсеніду галію і її легуванням атомами германію. *Наукові вісті НТУ КПП*. 2000. №2. С. 5–8.
131. Штейнгарт А. П. Применение метода поверхностной фото-ЭДС для анализа процесса химической обработки GaAs. *Вестник Новгородского государственного университета*. 2004. №26. С. 173–174.
132. Травитель для арсенида галлия: пат. 2063095 Российская Федерация: МПК H01L 21/306. №93026208/25; заявл. 07.05.93; опубл. 27.06.96, Бюл. № 17-2000.
133. Muracani V. D. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2002. Vol. 3, №1. P. 27.
134. Нисков В. Я., Кубецкий Г. А. Сопротивление омических контактов к тонким слоям полупроводников. *Физика и техника полупроводников*. 1970. Т. 4, №9. С. 1806–1808.
135. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл-InP и металл-GaAs / Е. Ф. Венгер и др.; / ред.: Р. В. Конакова. АН Республики Молдова, Ин-т прикладной физики. Киев: НАН Украины, 1999. 233 с.
136. Дмитрієв В. С. Омичні контакти на основі срібла для НВЧ приладів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С. 54-57. ISSN 2313-5352.

137. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів термічної обробки гетероструктури на арсеніді галію. *Фізика, електроніка, електротехніка: 2017: Матеріали НТК.*(Суми, 17-21 квітня 2017 р.). Суми, 2017. С. 110.

138. Дмитрієв В. С. Багатокомпонентні омичні контакти до GaAs. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. Вінниця: ВНТУ. 2017. № 3, С.1-6. [S.l.], п. 3, oct. 2017. ISSN 2307-5376. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/517>.

139. Спосіб виготовлення омичного контакту до GaAs: пат. 119444 Україна: МПК H01L 21/28. № u201703416; заявл. 10.04.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. 5 с.

140. Зуев С. А., Килесса Г. В., Асанов Э.Э., Старостенко В. В., Покрова С.В. Зависимость проводимости от толщины активной области в тонкопленочных диодах Шоттки на GaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50, №6. С. 825–829. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43212>

141. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шоттки на арсеніді галію: пат. 95094 Україна: МПК H 01L 29/47. № u201407081; заявл. 23.06.14; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23. 5 с.

142. Investigations on Au, Ag, and Al Schottky Diodes on Liquid Encapsulated Czochralski Grown n-GaAs [100] / S. Arulkumaran et al.; *Journal of Electronic Materials*. 1995. Vol. 24, №7. P. 813–817.

143. Торхов Н. А., Новиков В. А. Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики. *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45, № 1. С. 70–86.

144. Hernández M. P., Alonso C. F., Peña J. L. Barrier height determination in homogeneous nonideal Schottky contacts. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. Vol. 34, №8. P. 1157–1162.

145. Мамедов Р. К. Зависимости электрофизических параметров диодов Шоттки с дополнительным электрическим полем от концентрации примесей

полупроводника. *Вестник Бакинского Университета, серия физ. мат. наук.* 2002. №3. С. 34–42.

146. Güllü Ö., Biber M., Van Meirhaeghe R. L., Türüt A. Effects of the barrier metal thickness and hydrogen pre-annealing on the characteristic parameters of Au/n-GaAs metal–semiconductor Schottky contacts. *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516., №21. P. 7851–7856. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.05.015>

147. Kim H. C., Alford T. L. Improvement of the thermal stability of silver metallization. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol.94, № 8. P. 5393–5395.

148. Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Hoffmann A., Weiss R. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method. *Solid-State Electronics*. 2002. №5. P. 615–619.

149. Karaboga N., Kockanat S., Dogan H. The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony *Applied Intelligence*. 2013. №3. P. 279–288.

150. Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method / A. Ortiz-Conde et al.; *Solid-State Electronics*. 1999. №4. P. 845–848.

151. Пипинис П. А., Римейка А. К., Лапейка В. А., Пипинене А. В. Механизм обратного тока в диодах с барьером Шоттки Al/p-InP. *Физика и техника полупроводников*. 2001. №2. С. 188–191. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38454>.

152. Bennet R. A. Interpretation of forward bias behavior of Schottky barriers. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1987. Vol. 34, №4. P. 935 – 937.

153. Williams R. Effect of barrier recombination on production of hot electrons in a metal by forward bias injection in a Schottky diode. *RCA Review*. 1969. № 30. P. 306.

154. Kudryk Ya. Ya., Shynkarenko V. V., Slipokurov V. S., Bigun R. I., Kudryk R. Ya. Methods for determination of Schottky barrier height from I-V curves. CriMiCo'2014, Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 7-13, 2014.

P.673-674.

155. Шинкаренко В. В., Слепокуров В. С., Бигун Р. И., Кудрик Р. Я. Программа для расчета высоты барьера Шоттки. *Сайт Лаб. № 33 ИФП им. В. Е. Лошкарева*. URL: <https://isp/kyiv.ua/index.php/uk/component/content/article/908-publications/lab33/lab-33-ustanovky/3944>

156. Дмитрієв В. С. Інжектуючі бар'єрні переходи на основі арсеніду галія для приладів НВЧ діапазону. *Перспективні технології та прилади*. 2017. Вип. 10(1). С. 50-53. ISSN 2313-5352

157. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 4, С. 88-92. ISSN 1997-9266.

158. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шотткі до GaAs: пат. 119116 Україна: МПК Н 01 L 29/47. № u201703427; заявл. 10.04.17; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17. 5 с.

159. Дмитриев В. С. Влияние методов определения параметров барьерного перехода на их точность. *Журнал нано- та електронної фізики* Суми, 2017. Вип. 9, № 5. С. 05037-1 – 05037-5. DOI: 10.21272/jnep. 9 (5).05037.

160. Dmitriev V. Influence of heat treatment on the main quality indicators of heterojunctions Ag/n-n⁺GaAs. *“Litteris et Artibus”*: Матеріали VII міжнародного молодіжного наукового форуму (Львів, 23-25 лист. 2017 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 402-403.

161. Дмитриев В. С. Точность определения параметров гетеропереходов методом вольт-амперной характеристики. *Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології*: матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф. (Одеса, 10-11 жовт. 2017 р.) Одеса: ОДАТРЯ, 2017. С. 63-64.

162. Дмитриев В. С., Дмитриева Л. Б., Швеце Е. Я. Технологические особенности изготовления СВЧ прибора с барьерами Шоттки. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2018. Т. 61, № 2, С. 108-116, DOI: 10.20535/S002134701802005X.

163. Дмитрієв В. С. Вплив термічної обробки на вольт-амперну характеристику та інжекційні властивості гетеропереходу Ag/n-n⁺GaAs.

Радиоэлектроника, информатика, управление. Запоріжжя, 2018. № 2. С. 7-13.
DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-1.

164. Дмитрієв В. С. Вплив способу обробки поверхні GaAs-підкладки на питомий перехідний опір омичних контактів на основі срібла. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2018. №3. С. 258-263.

165. Дмитрієв В. С. Дослідження основних чинників впливу на якість омичних контактів до тонкоплівкового НВЧ приладу на n-GaAs. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2018. №1. С. 188-193.

166. Шур М. С. Современные приборы на основе арсенида галлия / пер. с англ. С. Д. Барановского и др. М.: Мир. 1991. 632 с.

167. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе n-GaAs, n-InP и n-GaN. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2010. № 1. С. 33-37.

168. Сергеев С. А., Сенатов О. С., Сергеева Б. В. Граничная частота усиления волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе нитрида индия. *Ученые Записки Физического Факультета МГУ*. 2015. №5. С.155502-1–155502-5.

169. Барыбин А. А., Михайлов А. И. Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах. *Журнал технической физики*. 2000. Т. 70. №. 2. С. 48-52.

170. Dean R. H., Matarese R. J. The GaAs traveling wave amplifier as a new kind of microwave transistor. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 60, №.12. 1972. P. 1486-1502. DOI: 10.1109/PROC.1972.8948

171. Dean R. H., Dreeben A. B., Hugches J. J., Matarese R. J., Napoli L. S., Broad-Band Microwave Measurements on GaAs «Traveling-Wave» Transistors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973. Vol. 21, №.12. P. 805-809. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1128135.

172. Kumabe K., Kanbe H. GaAs travelling-wave amplifier *International Journal of Electronics*. 1985. Vol. 58, № 4. P. 587-611. DOI: 10.1080/00207218508939056.

173. Евстафьев Н. В., Баранцева О. Д., Савченко В. Г. Установление колебаний в МЭП-приборах. Компоненты и материалы электронной техники. Сб. науч. тр. К.: УМК ВО. 1989. С.100-107.

174. Dean R. H. Optimum design of thin-layer GaAs amplifiers. *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57, №7. P. 1327–1328. DOI: 10.1109/PROC.1969.7257.

175. Grimalsky V. V., Escobedo-Alatorre J., Tecpoyotl-Torres M., Koshevaya S. V. Non-linear interaction of space charge waves in GaAs semiconductor. 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002): 23rd International Conference on Microelectronics. Proceedings (Cat. No.02TH8595) Nis, Yugoslavia,, Mol 1, NIŠ, Yugoslavia, 12-15 May, 2002. IEEE, 2002. P. 327-330.

176. Прохоров Э. Д., Боцула О. В., Клименко О. А. Влияние междолинного переноса электронов на эффективность генерации диодов с туннельными границами на основе GaAs. *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. №4. С. 75-80.

177. А.с. 714968, СССР, H01L.29/41. СВЧ-прибор / О. Д. Баранцева, В. Л. Костенко (СССР). № 2623820/25; заявл. 01.06.78 ; опубл. 20.05.96.

178. Дмитрієв В. С., Швець Є. Я. Технологические особенности изготовления усилителя бегущей волны. *Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2014»*: Сборн. матер. 10-й междунар. молодежной научно-техн. конф. (Севастополь, 12-17 мая 2014 г.) Севастополь: СевНТУ, 2014. С. 158. (ISBN 978-617-612-072.).

179. Багатоелектродний МЭП-прилад: пат. 132132 Україна: МПК H01L 29/41, 45/02. № u201809445; заявл. 19.09.18; опубл. 11.02.19, Бюл. № 3. 5 с.

ДОДАТОК А

Математична обробка у пакеті програм Microsoft Excel результатів досліджень параметрів омичних контактів Ag-Ge-In/n-n⁺GaAs та похибок вимірювання

T _{відп} (K)	t _{відп} , с	ρ розр.	ρ сер. виб.	Абс. пох.	Відн. пох.	Сер квадр. пох.	Довірчий інтервал	
							P(95%)	P(99%)
893	60	5,00E-05	4,99E-05	1,33333E-07	2,67E-03	4,44444E-08	4,98E-05÷ 4,99E-05	4,98E-05÷ 4,99E-05
		4,95E-05		3,66667E-07	7,35E-03	1,22222E-07		
		5,02E-05		3,33333E-07	6,68E-03	1,11111E-07		
		4,96E-05		2,66667E-07	5,35E-03	8,88889E-08		
		4,98E-05		6,66667E-08	1,34E-03	2,22222E-08		
		5,00E-05		1,33333E-07	2,67E-03	4,44444E-08		
		4,97E-05		1,66667E-07	3,34E-03	5,55556E-08		
		5,01E-05		2,33333E-07	4,68E-03	7,77778E-08		
		4,99E-05		3,33333E-08	6,68E-04	1,11111E-08		

ДОДАТОК Б

Математична обробка у пакеті програм Microsoft Excel результатів досліджень параметрів інжектуючих бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs та похибок вимірювання.

Т _{відп} (К)	ρ _{розр.}	ρ _{сер. виб.}	Абс. пох.	Відн. пох.	Сер квадр. пох.	Довірчий інтервал	
						P(95%)	P(99%)
803	9,20E-01	9,43E-01	0,018889	2,01E-02	0,006296	9,38E-01÷9,48E-01	9,36E-01÷9,50E-01
	9,30E-01		0,008889	9,47E-03	0,002963		
	9,40E-01		0,001111	1,18E-03	0,00037		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
	9,50E-01		0,011111	1,18E-02	0,003704		
Час відпалу контакту: t _{відп} = 6·10 ² с							

ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Дмитрієв В. С. Вплив термічної обробки на вольт-амперну характеристику та інжекційні властивості гетеропереходу $\text{Ag/n-n}^+\text{GaAs}$. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запоріжжя, 2018. № 2. С. 7-13. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-1. (фахове видання, індексується у *Web of Science Core Collection, Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI*).
2. Дмитрієв В. С. Вплив способу обробки поверхні GaAs-підкладки на питомий перехідний опір омичних контактів на основі срібла. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2018. №3. С. 258-263. (фахове видання, індексується у *Google Scholar, Index Copernicus International, RSCI, Polish Scholarly Bibliography*).
3. Дмитрієв В. С. Дослідження основних чинників впливу на якість омичних контактів до тонкоплівкового НВЧ приладу на n-GaAs. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2018. №1. С. 188-193. (фахове видання, індексується у *Google Scholar, RSCI*).
4. Дмитрієв В. С. Омичні контакти на основі срібла для НВЧ приладів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С. 54-57. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у *Google Scholar*).
5. Дмитрієв В. С. Багатокомпонентні омичні контакти до GaAs. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету: електрон. наук. фахове вид.* 2017. № 3. С.1-6. ISSN 2307-5376. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/517>. (фахове видання, індексується *Google Scholar*)
6. Дмитрієв В. С. Інжектуючі бар'єрні переходи на основі арсеніду галію для приладів НВЧ діапазону. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10(1). С.50-53. ISSN 2313-5352. (фахове видання, індексується у *Google Scholar*).

7. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів формування інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2017. № 4, С. 88-92. ISSN 1997-9266. (фахове видання, індексується у *Google Scholar*, *Index Copernicus International*, *RSCI*).

Статті в інших наукових виданнях України

8. Дмитриев В. С., Дмитриева Л. Б., Швец Е. Я. Технологические особенности изготовления СВЧ прибора с барьерами Шоттки. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. Киев, 2018. Т. 61, № 2, С. 108-116, DOI: 10.20535/S002134701802005X. (фахове видання, індексується у: *Scopus*, *Google Scholar*, *Web of Science Core Collection*, *RSCI*).

9. Дмитриев В. С. Влияние методов определения параметров барьерного перехода на их точность. *Журнал нано- та електронної фізики* Суми, 2017. Вип. 9, № 5. С. 05037-1 – 05037-5. DOI: 10.21272/jnep. 9 (5).05037. (фахове видання, індексується у *Scopus*, *Index Copernicus International*, *Google Scholar*).

10. Dmitriev V. S. The modeling of the metal-semiconductor barrier transitions, which based on the chemical interaction. *SworldJournal*. 2016. Vol. 10. P. 55–58. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11610.pdf>. (індексується у *Google Scholar*, *Index Copernicus International*, *RSCI*).

11. Дмитриев В. С. Моделирование барьерных переходов металл-полупроводник на основе химического взаимодействия. *Научные труды Sword*. Иваново: 2016. Вып. 1(42), Т.4. С. 38–42. (індексується у *Google Scholar*, *RSCI*).

12. Дмитриев В. С., Швец Е. Я. Анализ экспресс-методов исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов. *Сборник научных трудов Sword*. Иваново, 2013. Вып. 4, Т. 8. С. 59–63. (ISSN2224-0187). (індексується у *Google Scholar*, *RSCI*).

Патенти

13. Спосіб виготовлення омічного контакту до GaAs: пат. 119444 Україна: МПК H01L 21/28. № u201703416; заявл. 10.04.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. 5 с.

14. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шотткі до GaAs: пат. 119116 Україна: МПК H 01 L 29/47. № u201703427; заявл. 10.04.17; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17. 5 с.

15. Багатоелектродний МЕР-прилад: пат. 132132 Україна: МПК H01L 29/41, 45/02. № u201809445; заявл. 19.09.18; опубл. 11.02.19, Бюл. № 3. 5 с.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

16. Дмитрієв В. С. Оптимізація режимів термічної обробки гетероструктури на арсеніді галію. *Фізика, електроніка, електротехніка: 2017*: Матеріали НТК.(Суми, 17-21 квітня 2017 р.). Суми, 2017. С. 110.

17. Dmitriev V. Influence of heat treatment on the main quality indicators of heterojunctions Ag/n-n⁺GaAs. *"Litteris et Artibus"*: Матеріали VII міжнародного молодіжного наукового форуму (Львів, 23-25 листопада 2017 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 402-403.

18. Дмитриев В. С. Точность определения параметров гетеропереходов методом вольт-амперной характеристики. *Технічне регулювання, метрологія і інформаційні технології*: матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф. (Одеса, 10-11 жовтня 2017 р.) Одеса: ОДАТРА, 2017. С. 63-64. (індексується у *Google Scholar*).

19. Дмитрієв В. С., Швець Є. Я. Дослідження впливу рівня інжекції неосновних носіїв заряду у контактах метал-напівпровідник на параметри напівпровідникових приладів НВЧ діапазону. *XX НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА*: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.3.

20. Швець Є. Я., Дмитрієв В. С. Аналіз основних розрахункових співвідношень для опису різних видів інжекції. *XX НТК студентів,*

магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА: матеріали XX наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (Запоріжжя, 20-24 квітня 2015 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2015. Т. 3. С.4.

21. Дмитриев В. С., Шве́ц Е. Я. Экспериментальные исследования влияния уровня инжекции неосновных носителей заряда в контактах металл-арсенид галлия на параметры приборов микроволнового диапазона с барьерами Шоттки. *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 19-го междунар. молодежного форума* (г. Харьков, 20-22 апреля 2015 г.). Харьков: ХНУРЭ, 2015. Т. 1. С. 17–18.

22. Дмитрієв В., Шве́ць Є. Вплив інжектованих неосновних носіїв заряду на параметри діоду з бар'єром Шоттки. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвяч. 55-річчю заснув. ТНТУ та 170-річчю з дня народж. І. Пулюя* (Тернопіль, 19–21 травня 2015 р.). Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 10–11. (індексується у *Google Scholar*).

23. Дмитриев В. С. Развитие физической модели неоднородных контактов металл-полупроводник. *Moderní vymoženosti vědy – 2014: materialy X mezinárodní vědecko-praktická konference* (Praha, 27.01-05.02.2014) Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. Díl 39 «Technické vědy». С. 3–5. (ISBN 978-966-8736-05-6).

24. Dmitriev V. S., Shvets E. Y. The influence of the semiconductor's surface states on straightening properties of devices. *XVIII НТК студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА: матеріали XVIII наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА* (Запоріжжя, 15-19 квітня 2013 р.). Запоріжжя: ЗДІА, 2013. Т. 3. – С. 6.

ДОДАТОК Г

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Директор
ТОВ «ІСТРЕЛ»**



І.А. Стреленко

«20» Квітня 2017 р.

АКТ

**про впровадження результатів
дисертаційної роботи Дмитрієва Вадима Сергійовича**

м. Запоріжжя

2017 р.

Даним актом підтверджується, що на ТОВ «ІСТРЕЛ» в процесі створення контактів до напівпровідникових приладів використані результати дисертаційної роботи Дмитрієва Вадима Сергійовича на тему «Омічні та інжектуючі бар'єрні переходи до арсеніду галію».

Головний інженер

A handwritten signature in blue ink is located below the 'Головний інженер' text. The signature is stylized and appears to be 'Г.І. Іванський'.

Г.І. Іванський


УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО "УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ - УКРАИНА"
А.Е. ШВЕЦОВ
2015 г.

АКТ № 3

о внедрении результатов
диссертационной работы Дмитриева Вадима Сергеевича

г. Запорожье

2015 г.

Настоящим актом подтверждается, что на ООО «Универсальное оборудование «УКРАИНА» при создании контактов к полупроводниковым приборам на арсениде галлия использованы результаты диссертационной работы Дмитриева Вадима Сергеевича «Исследование омических и инжектирующих барьерных переходов с заданным коэффициентом инжекции для приборов СВЧ диапазона».

В процессе внедрения для изготовления омических Ag-Ge-In/n-GaAs и инжектирующих контактов Ag/n-GaAs к полупроводниковым приборам были использованы разработанные в процессе исследований способы изготовления таких контактов в едином вакуумном цикле.

В результате использования предложенных технологий изготовления контактов были получены следующие результаты:

1.Повышена воспроизводимость параметров контактов металл-полупроводник.

2.Омические контакты Ag-Ge-In/n-GaAs с удельным переходным сопротивлением $(1,5...2)10^{-4}$ - $(5...7)10^{-5}$ Ом*см² имели коэффициент инжекции $\gamma = 0,07 - 0,00$.

3.Высота барьера Шоттки Ag/n-GaAs $\phi_b = 0.82$ эВ - 0.95 эВ. Уровень инжекции для различных контактов изменялся в пределах 4 - 10%.

Технический директор



Д.И. Якимчук

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ЕЛЕМЕНТ-ПЕРЕТВОРЮВАЧ»

А.І.СОЛОДОВНИК

«15»

2017 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Дмитрієва Вадима Сергійовича

м. Запоріжжя

2017 р.

Цим актом підтверджується, що в ТОВ «ЕЛЕМЕНТ-ПЕРЕТВОРЮВАЧ» при створенні омичних та інжектуючих контактів метал-напівпровідник було використано технологічні режими, рекомендовані за результатами дисертаційної роботи Дмитрієва Вадима Сергійовича.

Підтверджено, що омичні та інжектуючі бар'єрні переходи, отримані за запропонованою у дисертації технологією, мають відтворені параметри та характеристики.

Головний конструктор



КИРИЧЕНКО А.О.



Міністерство освіти і науки України
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ
 (ЗДІА)

пр. Соборний, 226, Запоріжжя, 69006, Україна
 E-mail: admin@zgia.zp.ua

тел./ факс (061) 283-08-38 тел. 236-90-34
 Код ЄДРПОУ 05402565

22.01.18 № 01-28/83

На № _____ від _____

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи В.С. Дмитрієва
 в навчальний процес Запорізької державної інженерної академії

Комісія спеціалістів кафедри мікроелектронних інформаційних систем факультету енергетики, електроніки та інформаційних технологій Запорізької державної інженерної академії склала цей акт про те, що в 2015-17 р. при підготовці фахівців за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньо-професійна програма «Мікроелектронні інформаційні системи», розроблено методичне забезпечення з дисципліни «Напівпровідникові квантові структури та надгратки», де в навчальний процес впроваджені результати наукових досліджень, наведені у дисертаційній роботі В.С. Дмитрієва на тему «Омічні та інжектуючі бар'єрні переходи до арсеніду галію».

Зокрема, у конспекті лекцій дисципліни: тема 2 «Елементи низькорозмірних структур», представлено аналіз елементів низькорозмірних структур, а саме: вільна поверхня, міжфазні межі, надгратки; тема 5 «Методи формування наноелектронних структур», розглянуто способи формування гетероструктур Ag-nGaAs.

У лабораторному практикумі: лабораторна робота №2 «Дослідження електрофізичних параметрів переходу метал-напівпровідник з бар'єром Шотткі»: використано методику визначення розрахунку електрофізичних параметрів гетеропереходів метал-напівпровідник за допомогою математичних методів і комп'ютерних програм.

Перший проректор



[Handwritten signature]

С.А. Воденніков

Хрипко (061) 227-12-45